



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**NÁVRH VYHŘÍVANÉ KOMORY UŽITEČNÉHO NÁKLADU
PRO STRATOSFÉRICKÝ BALÓN**

DESIGN OF AIRCONDITIONED CHAMBER FOR STRATOSPHERICAL BALOON

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Sebastián Gedeon

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Krejsa, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Sebastián Gedeon**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jiří Krejsa, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh vyhřívání komory užitečného nákladu pro stratosférický balón

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Meteorologické stratosférické balóny jsou relativně levným způsobem, jak dopravit do značných výšek přístroje pro měření nejrůznějších fyzikálních veličin. Během výstupu dochází k prudkým změnám teploty, které mohou vést ke kondenzaci vody uvnitř přístrojů a následnému poškození elektroniky. Podstatou práce je návrh vyhřívání komory, která bude udržovat teplotu užitečného zatížení balónu.

Cíle bakalářské práce:

1. Zpracujte rešerši stávajících řešení vyhřívání komor.
2. Kriticky zhodnoťte stávající řešení a vyberte perspektivní variantu.
3. Perspektivní variantu rozpracujte do fáze konstrukčního návrhu.

Seznam doporučené literatury:

YUNPENG Ma, JUN Huang, and MINGXU Yi, A Novel Technique for Predicting the Thermal Behavior of Stratospheric Balloon, International Journal of Aerospace Engineering, vol. 2018, Article ID 7806036, 10 pages, 2018.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cieľom tejto práce je návrh vyhrievanej komory pre stratosférický balón. Komora má za účel chrániť užitočný náklad pred poškodením vplyvom prostredia, v ktorom sa balón bude počas letu nachádzať. Postup riešenia problematiky ochrany užitočného nákladu spočíva v troch krokoch.

Prvý krok je charakterizovať dynamiku letu, t.j. charakterizovať parametre letu ako sú: doba stúpania, doba klesania, maximálna dosiahnutá výška, zmena vlastností vzduchu v závislosti na čase.

Druhý krok vypovedá o energetickej bilancii letu. Musia sa zadať celkové tepelné straty, poprípade celkový tepelný prírastok komory v rôznych poveternostných podmienkach vyplývajúce z kroku jedna.

Tretí krok spočíva v návrhu konštrukčných a funkčných prvkov samotnej vyhrievanej komory tak, aby mohla prekonať počas letu extrémne podmienky a nedošlo k ujme na užitočnom náklade.

Výpočty energetickej bilancie sú uvedené v nami zhotovenom dokumente v software Microsoft Excel. Tento dokument, je voľne dostupný a môže dopomôcť pri obdobných konštrukčných projektoch.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Vyhrievaná komora, stratosférický balón

ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is design of a heating chamber for a stratospheric balloon. The chamber's role is to preserve the load from the impact of the environment in which the balloon is going to be situated. The process of protection of the load is described in three steps.

The first one is to characterize the flight dynamics which consists of the following: elevation time, descending time, maximal height reached, air characteristics changes depending on time.

The second step deals with flight energetic balance. The total heat losses or the total heat increase of the chamber in different weather conditions have to be defined resulting from step one.

The third step is to design the constructing or functional elements of the heated chamber, so that the chamber could overcome extreme conditions during the flight and to prevent the damage to the load.

The energetic balance calculations are presented in the Microsoft Excel document. This document is free to read and can help with scientific construction projects.

KEYWORDS

Heat chamber, high altitude balloon

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

GEDEON, Sebastián. *Návrh vyhřívané komory užitečného nákladu pro stratosférický balón*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116775>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Jiří Krejsa.

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval za cenné pripomienky a rady svojim rodičom, vedúcemu záverečnej práce doc. Ing. Jiřímu Krejsovi, Ph.D. ďalej Ing. Jiřímu Hejčíkovi Ph.D. a prof. Ing. Josefovi Štětínovi Ph.D. a v neposlednom rade Jakubovi Robotovi.

PREHLÁSENIE AUTORA O PÔVODNOSTI PRÁCE

Prehlasujem, že diplomovú prácu som vypracoval samostatne, pod odborným vedením doc. Ing. Jiřího Krejsu, Ph.D. Zároveň vyhlasujem, že všetky zdroje obrazových a textových informácií, z ktorých som čerpal, sú riadne citované v zozname použitých zdrojov.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	14
2	TEÓRIA DYNAMIKY LETU	15
2.1	Úvod do kapitoly	15
2.2	Archimedov zákon	15
2.3	Distribúcia tlakov	15
2.4	Silová charakteristika letu	20
2.4.1	Systém hmotností balóna	20
2.4.2	Sily pôsobiace na balón vo vertikálnom smere	23
2.4.3	Sily pôsobiace na balón v horizontálnom smere	24
2.5	Rovnica vertikálneho pohybu	25
2.6	Simulácia balónového letu	26
2.6.1	Výber balónu pre simuláciu	26
2.6.2	Výber modelu padáka pre simuláciu	27
2.6.3	Výpočtový model softvérom Balloon Burst Calculator	28
2.6.4	Simulačný model softvérom High Altitude Balloon Flight Planner	29
2.7	Zhrnutie výsledkov 2. kapitoly	33
3	ENERGETICKÁ BILANCIA LETU	34
3.1	Obmedzenia výpočtového modelu	35
3.2	Základná rovnica tepla	35
3.3	Charakteristika atmosféry na čase	38
3.4	Prenos tepla konvekciou	40
3.4.1	Voľná konvekcia	40
3.4.2	Nútená konvekcia	43
3.5	Prenos tepla žiarením	45
3.5.1	Rovnica toku energie vlastnou emisivitou Q_r	47
3.5.2	Rovnica toku energie infračerveným žiarením Q_i	47
3.5.3	Rovnica toku energie priamym solárnym žiarením Q_s	50
3.5.4	Výsledky energetickej bilancie letu	53
3.5.5	Energetické modely letu pre rôzne scenáre	56
3.6	Zhrnutie výsledkov 3. kapitoly	58
4	KONŠTRUKČNÉ A FUNKČNÉ PRVKY	59

4.1	Ohrev komory	59
4.1.1	PTC termistory	60
4.1.2	Odporový výhrevný kábel	61
4.1.3	Teoretický výpočet výkonu vyhrievacieho telesa	62
4.1.4	Výber výhrevnej fólie	63
4.1.5	Výber napájacieho zdroja	64
4.1.6	Výber termostatu	65
4.1.7	Zapojenie komponentov do elektrického obvodu	66
4.2	Vlhkosť vzduchu v komore	67
4.3	Konštrukčné a funkčné návrhy	69
5	ZÁVER	71
6	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	72
7	ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN	76
8	ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV	76
9	ZOZNAM TABULIEK	78
10	ZOZNAM PRÍLOH	81

1 ÚVOD

Už od nepamäti sa človek pokúša posúvať hranice ďalej v technike, lekárstve, letectve, ale najznámejším príkladom sú preteky o pokorenie vesmíru v studenej vojne, kedy ľudstvo dokázalo dostať ľudskú posádku na mesiac v intervale 10 rokov. V dnešnej dobe je pokorovať vesmír omnoho jednoduchšie, jasným príkladom sú stratosférické balóny.

História balónov siaha až do ďalekej histórie grécka, kedy princíp fungovania balónov prvýkrát popísal Archimedes zo Syrakúz. Popísal jav plávajúcich telies do zákona, ktorý nájde uplatnenie aj po 2000 rokoch. Do balónovej histórie sa zapísal aj anglický minorita Roger Bacon, ktorý v polovici 13. storočia spozoroval a popísal vlastnosti niektorých plynov ľahších ako vzduch. Na poznatky Rogera Bacona nadväzoval v roku 1670 Francesco Lana de Terzi, ktorý napísal knihu o teoretickom fungovaní vákuového balóna, čo je najideálnejší variant konštrukcie balóna, ktorý však ostal len na teoretickej báze. V posledných rokoch sa do balónovej histórie zapísal taktiež rakúsky skydiverista Felix Baumgartner, ktorý sa stal prvým človekom, ktorý vyskočil zo stratosférického balóna v nadmorskej výške 39 km a pristal na zemi.[1]

Stratosférické balóny sú jednoduchou a najmä lacnou variantnou, ako dostať užitočný náklad do výšok dosahujúcich až 50 km nadmorskej výšky, do vrstvy atmosféry nazývanej stratosféra, ktorá sa považuje za okraj vesmíru, len za pomoci latexového balóna a jedného z komerčne užívaných zdvihových plynov. Počas letu bude balón prekonávať veľké teplotné a tlakové rozdiely. Preto je nevyhnutná prevencia proti poškodeniu pred chladom, poprípade vlhkosťou a zabezpečenie plynulého chodu užitočného nákladu. K danej problematike existuje len málo zdrojov informácií, z dôvodu utajovania firemného know-how a podobne. Našou úlohou je teda komplexne analyzovať danú problematiku, pochopiť dané aspekty letu, dynamiku letu a energetickú bilanciu komory, ktoré sa vzájomne ovplyvňujú. Po pochopení danej problematiky a prevedení potrebných výpočtov, budeme schopní navrhnúť nielen komoru a izoláciu, ale aj doteraz komerčne nepoužívané vyhrievanie komory a ďalšie konštrukčné prvky.

2 TEÓRIA DYNAMIKY LETU

2.1 Úvod do kapitoly

V tejto kapitole sa budeme venovať dynamickým aspektom letu. Komplexne rozoberieme teoretickú distribúciu tlakov v balóne počas letu, silové podmienky potrebné pre prekonanie gravitačnej sily a zadefinujeme si celkovú a virtuálnu váhu a základnú rovnicu letu. Následne pomocou výpočtových softvérov Balloon Burst Calculator a Astra High Altitude Balloon Flight Planner získame hodnoty potrebné pre zhotovenie letovej charakteristiky, potrebnej pre výpočty v kapitole 3, venujúcej sa energetickej bilancii letu.

Postup uvažovania a rovnice použité v kapitole 2.3, 2.4 a 2.5 boli prebraté a upravené pre našu potrebu a doplnené autorovým komentárom za pomoci.[2]

2.2 Archimedov zákon

Archimedov zákon uvádza, že teleso ponorené do kvapaliny je nadľahčované hydrostatickou vztlakovou silou, ktorej veľkosť sa rovná tiaži kvapaliny s rovnakým objemom, ako je objem ponorenej časti telesa. Tento zákon môžeme aplikovať aj na telesá v zemskej atmosfére nasledovne: vztlaková sila sa rovná rozdielu hmotnosti vytlačeného vzduchu a zdvihového plynu. Ak teda F_{vz} je vztlaková sila, m_a je hmotnosť vytlačeného vzduchu, m_g je hmotnosť zdvihového plynu a g je gravitačné zrýchlenie, potom platí rovnica:

$$F_{vz} = g \cdot (m_a - m_g) \quad (2.1)$$

2.3 Distribúcia tlakov

Rovnica (2.1) je všeobecná, pojednáva o vytláčaní vzduchu len samotným balónom, pri reálnom lete stratosférického balóna je však vzduch vytláčaný aj užitočnou záťažou, padákom, konštrukciou atď. Hmotnosť tohto vytlačeného vzduchu je však zanedbateľná, v porovnaní so vzduchom vytlačeným plynom balóna.

Pri distribúcii tlakov je dôležité sa pozrieť na rozloženie tlakových síl na povrch balóna. Zo vzťahu pre hydrostatický tlak pre tlakový rozdiel vo vrstve vzduchu s rovnakou hustotou platí:

$$dp = -g \cdot \rho \cdot dz \quad (2.2)$$

kde dp je zmena tlaku plynu, ρ je hustota plynu v homogénnom priestore záujmu a dz je vertikálna zmena výšky nad ľubovoľnou vzt'aznou rovinou. Rovnicu (2.2) môžeme integrovať pre jednoduchý model atmosféry, na získanie popisu tlakov, v závislosti na výške pre tlak vzduchu (2.3) a tlak zdvihového plynu (2.4)

$$p_{a,z} = p_{a,0} - \int_{z_0}^z g \cdot \rho_a \cdot dz \quad (2.3)$$

$$p_{g,z} = p_{g,0} - \int_{z_0}^z g \cdot \rho_g \cdot dz \quad (2.4)$$

Rozdiel tlakov naprieč stenou balóna, nenapusteného doplna zdvihovým plynom platí, že $p_{a,z} = p_{g,z}$ preto rozdielom rovníc (2.3) a (2.4) získame rovnicu:

$$p_{a,z} - p_{g,z} = -\left(\int_{z_0}^z g \cdot \rho_a \cdot dz - \int_{z_0}^z g \cdot \rho_g \cdot dz\right) \quad (2.5)$$

Po integrovaní:

$$p_{a,z} - p_{g,z} = -g \cdot (\rho_a - \rho_g) \cdot (z - z_0) \quad (2.6)$$

Teda pre zdvihový plyn, ktorý má hustotu nižšiu, ako je okolitý vzduch, je tlak zdvihového plynu väčší, ako je tlak okolitého vzduchu. Je známe, že ani tlak vzduchu ani gravitačné zrýchlenie nie sú konštantné so stúpajúcou nadmorskou výškou. Pre naše výpočty môžeme zanedbať variabilitu gravitačného zrýchlenia, z dôvodu veľmi malých zmien.

So známou variáciou hustoty obidvoch plynov s výškou v atmosfére je nutné pozmeniť rovnicu (2.6) aj napriek tomu, že by chyba vzniknutá použitím rovnice (2.6) pre reálnu atmosféru, nebola príliš veľká. Pre korekciu rovnice (2.6) určíme najprv stavovú rovnicu pre ideálny plyn:

$$\rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T} \quad (2.7)$$

kde M je molárna hmotnosť, R je univerzálna plynová konštanta, T je teplota, ρ je hustota.

Hodnoty pre molárnu hmotnosť jednotlivých komerčne využívaných zdvihových plynov:

Plyn	Chemická značka	Molárna hmotnosť [kg.mol ⁻¹]	Zdvihoý index [1 - $\frac{M_g}{M_a}$]
Ideálny zdvihoý plyn	-	0,0000	1,000
Vodík	H ₂	2,0159	0,930
Hélium	He	4,0032	0,862
Deutérium	D ₂	4,032	0,861
Metán	CH ₄	16,04	0,446
Amoniak	NH ₃	17,03	0,412
Vodná para	H ₂ O	18,01	0,378
vzduch	Zmes N ₂ , O ₂ , atď.	28,96	0,000

tab. 2-1 Molárne hmotnosti zdvihových plynov pre stratosférické balóny.

Molárna hmotnosť vzduchu vo všetkých výškach záujmu balóna je 28,96 [kg.mol⁻¹]. Hodnoty molárnej hmotnosti zdvihového plynu sú uvedené v tabuľke 2-1. Vzduch a bežné zdvihové plyny sa pri letových teplotách a tlakoch správajú približne rovnako ako ideálny plyn. Preto môžeme substituovať rovnicu (2.2) a (2.7):

$$dp = -g \cdot \frac{p \cdot M}{R \cdot T} \cdot dz \quad (2.8)$$

Následne po úprave a integrovaní získame vzťah:

$$[\ln p]_{p_0}^{p_z} = -\frac{g \cdot M}{R} \cdot \int_{z_0}^z \frac{dz}{T} \quad (2.9)$$

Pre malé vertikálne vzdialenosti v zemskej atmosfére je kolísanie teploty s výškou približne lineárne. Ak teda $L_a = dT_a/dz$ a zároveň $L_g = dT_g/dz$ sú konštanty v rozmedzí $(z - z_0)$, kde L_a a L_g sú vertikálne teplotné gradienty, tak platí

$T_{a,z} = T_{a,z0} + L_a \cdot (z - z_0)$ a zároveň $T_{g,z} = T_{g,z0} + L_g \cdot (z - z_0)$. Môžeme teda rovnicu (2.9) prepísať do nasledovného tvaru, pre vzduch a zdvihový plyn:

$$\ln \frac{p_{a,z}}{p_{a,z0}} = -\frac{gM_a}{RL_a} \ln \left[\frac{T_{a,0} + L_a \cdot (z - z_0)}{T_{a,0}} \right] \quad (2.10)$$

$$\ln \frac{p_{g,z}}{p_{g,z0}} = -\frac{gM_g}{RL_g} \ln \left[\frac{T_{g,0} + L_g \cdot (z - z_0)}{T_{g,0}} \right] \quad (2.11)$$

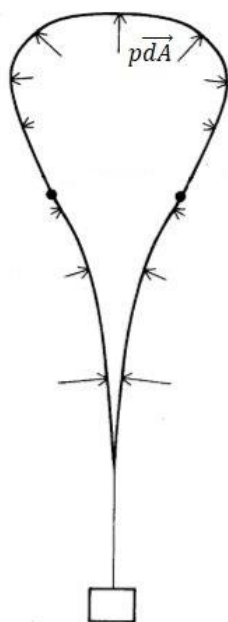
Všeobecne platí, že $p_{a,z0} = p_{g,z0} = p_{z0}$, a tak môžeme obdobne ako rovnicu (2.6), napísať pre rozdiel tlakov rovnicu (2.12):

$$P_{a,z} - P_{g,z} = p_{z0} \cdot \left\{ \left[1 + \frac{L_a \cdot (z - z_0)}{T_{a,0}} \right]^{-\frac{gM_a}{RL_a}} - \left[1 + \frac{L_g \cdot (z - z_0)}{T_{g,0}} \right]^{-\frac{gM_g}{RL_g}} \right\} \quad (2.12)$$

Pre pochopenie rozdielu rovníc (2.6) a (2.12) si určíme sledovaný úsek ($z - z_0$) napr. 100m, ďalej dosadíme niektoré konštanty odpovedajúce atmosfére a po vyriešení rovnice (2.12) získame:

$$p_{a,z} - p_{g,z} = -0,01184 p_{z0} \quad (2.13)$$

Z čoho vyplýva rozdiel pri použití rovníc (2.6) a (2.12) menej ako 1 %. Tlak pôsobí na stenu balóna v smere kolmom na rovinu steny. Môžeme teda plochu plášťa nahradiť nekonečne veľa a nekonečné malými plochami s normálovým vektorom \vec{dA} , potom tlaková sila na jednu z týchto plôch je $p\vec{dA}$. Prejav tlakových síl môžeme pozorovať priamo pri lete balóna, keďže sú kolmé na plochu stien balóna.



obr. 2-1 Obrázok prejavu tlakových síl na plochu stien balóna.[2]

Potom výsledný vektor vztlakovej sily \vec{F}_{vz} získame substitúciou $(p_{a,z} - p_{g,z})$ z rovníc (2.6) alebo (2.12) do rovnice (2.14) a následnou integráciou diferenciálnych tlakových síl po ploche steny plášťa:

$$\vec{F}_{vz} = - \iint_S (p_{a,z} - p_{g,z}) \vec{dA} \quad (2.14)$$

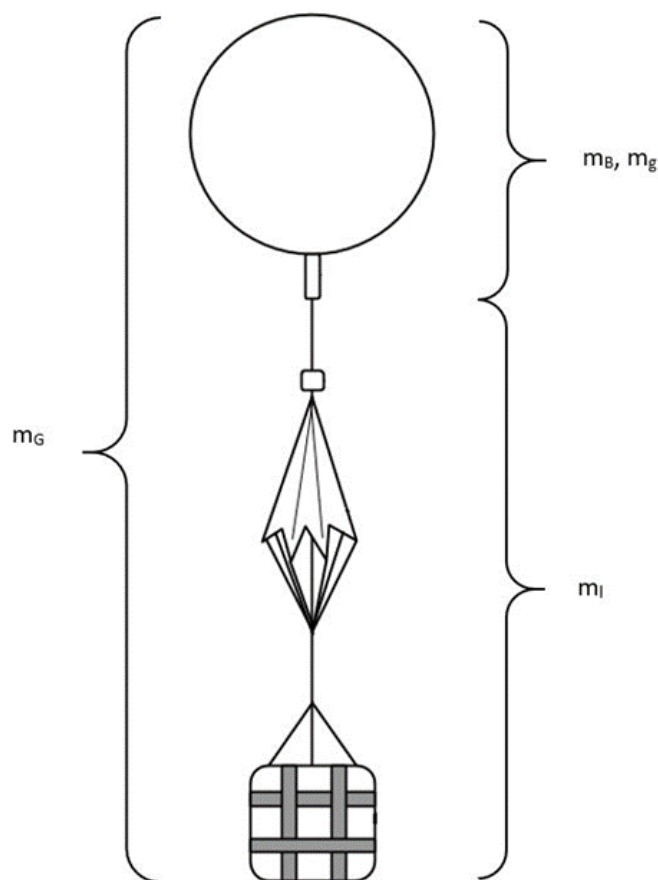
Získame vektor vztlakovej sily \vec{F}_{vz} smerujúci kolmo nahor. Veľkosť výslednej vztlakovej sily je takmer totožná s hodnotou vztlakovej sily z rovnice (2.1).

2.4 Silová charakteristika letu

Silová charakteristika letu sa zaoberá popisom síl pôsobiacich na balónový systém. Tieto sily majú za následok stúpanie alebo klesanie balónového systému.

2.4.1 Systém hmotností balóna

Stratosférický balón sa skladá z balóna, padáku, komory, užitočného nákladu a konštrukčných prvkov, ako sú popruhy, poprípade kostra konštrukcie. Jednotlivé segmenty systému si označíme nasledovne: m_B je hmotnosť balóna vrátane plášťa, nosného hrdla, ventilu atď., m_l je hmotnosť užitočného nákladu, komory, padáku a konštrukčných prvkov, m_g je hmotnosť zdvihového plynu, m_a je hmotnosť vytlačeného vzduchu a m_G je hrubá hmotnosť systému t.j. ($m_G = m_B + m_l$).



obr. 2-2 Obrázok rozdelenia hmotností balónového systému.

Aby platil Archimedov zákon, musí balónový systém v nehybnej atmosfére nahradiť objem vzduchu o rovnakej váhe, ako je vlastná váha balónového systému, vtedy hovoríme o vztlakovej rovnováhe:

$$g \cdot (m_G + m_g) = g \cdot (m_B + m_l + m_g) = g \cdot m_a \quad (2.15)$$

Pričom platí:

$$m_g = \frac{M_g p_g V_g}{RT_g} \quad (2.16)$$

$$m_a = \frac{M_a p_a V_a}{RT_a} \quad (2.17)$$

Môžeme substituovať do rovnice (2.15) a po úprave dostaneme vzťah:

$$m_G + m_a \left(\frac{M_g p_g V_g T_a}{M_a p_a V_a T_g} - 1 \right) = 0 \quad (2.18)$$

$$m_G + m_g \left(\frac{M_a p_a V_a T_g}{M_g p_g V_g T_a} - 1 \right) = 0 \quad (2.19)$$

Keďže počas letu dochádza k malým únikom zdvihového plynu skrz plášť balóna, spôsobený pretlačovaním cez mikropóry plášťa, rozdielom teplôt zdvihového plynu a vzduchu, musíme zadať premenné: supertlak (superpressure π) a superteplota (supertemperature Φ):

$$\pi = p_g - p_a \quad (2.20)$$

$$\Phi = T_g - T_a \quad (2.21)$$

Ďalej môžeme rovnicu (2.18) prepísať nasledovne:

$$m_G + m_a \left(\frac{(p_a + \pi)T_a M_g}{M_a p_a (T_a + \Phi)} - 1 \right) = 0 \quad (2.22)$$

Počas letu balónu budú supertlak a superteplota neustále meniť svoje hodnoty. Rovnica (2.18) je preto silne závislá na vzájomnej kombinácii supertlaku a superteploty spolu s pomerom molárnych hmotností zdvihového plynu a vzduchu $\left(\frac{M_g}{M_a}\right)$. Závislosti sú uvedené v tabuľke číslo 2-2:

π	Φ	$\left(\frac{M_g}{M_a}\right)$	vlastnosti
0	0	<1	Plyn ľahší ako vzduch.
0	>0	<1	Plyn ľahší a teplejší ako vzduch.
0	<0	<1	Plyn ľahší a chladnejší ako vzduch.
>0	0	<1	Plyn je ľahší a tlak plynu väčší ako okolitý vzduch.
>0	>0	<1	Plyn je ľahší a teplejší, tlak plynu väčší ako vzduch.
>0	<0	<1	Plyn je ľahší a chladnejší, tlak plynu väčší ako vzduch.

tab. 2-2 Fyzikálny charakter plynu v balóne.

Pre výpočet hmotnosti balónu však vychádzame z princípu virtuálnej hmotnosti. Ten uvažuje o celkovej hmotnosti (m_v) nasledovne:

$$m_v = m_G + m_g \cdot \left(1 + C_B \cdot \frac{M_a p_a (T_a + \Phi)}{(p_a + \pi) T_a M_g} \right) \quad (2.23)$$

kde C_B je koeficient pridanej hmotnosti v balónovej sústave akcelerujúcej vzduchom.

2.4.2 Sily pôsobiace na balón vo vertikálnom smere

Najvýznamnejšie sily pôsobiace na balónový systém počas letu, sú sily gravitačné, vztlakové a aerodynamické, zdvihové a odporové sily. Sily aerodynamické, zdvihové a odporové nastávajú len vtedy, keď sa balón hýbe, vzhľadom ku okolitému vzduchu, teda dochádza ku obtekaniu balónového systému vzduchom.

Rovnica (2.19), ktorá bola odvodená pre balón v stave vztlakovej rovnováhy, môže byť zovšeobecnená tak, že do nej zahrnieme voľný zdvih (\vec{F}_f) a to tak, že do rovnice implikujeme gravitačné a aerostatické sily nasledovne:

$$\vec{F}_f = -g \cdot \vec{k} \cdot \left\{ m_G + m_g \left[1 - \frac{M_a P_a (T_a + \Phi)}{M_g T_a (P_a + \pi)} \right] \right\} \quad (2.24)$$

Záporný zmysel vektoru \vec{k} rovnice (2.24) je dôležitý na dosiahnutie kladnej hodnoty voľného zdvihu. Táto sila má opačný zmysel ako sily odporové (F_d):

$$\vec{F}_d = -\frac{1}{2} \cdot \vec{k} \cdot C_D \cdot \rho_a \cdot A_D |\vec{v}_B - \vec{v}_a| \cdot (\vec{v}_B - \vec{v}_a) \quad (2.25)$$

kde C_D je koeficient odporu, A_D je efektívna plocha prierezu balóna, kolmá na vektor relatívnej rýchlosti vzduchu, \vec{v}_B je rýchlosť balóna a \vec{v}_a je rýchlosť vzduchu. Koeficient odporu je funkciou tvaru balóna (meniaceho sa výškou) a Reynoldsového čísla, ktoré je pomerom zotrvačných a trecích síl na povrchu plášťa balóna a vzťahuje sa na tvar balóna obtekaného vzduchom, pojednáva o tom, či bude prúdenie vzduchu na konkrétnom mieste plášťa v medznej vrstve turbulentné alebo laminárne. Reynoldsovo číslo je bezrozmerné číslo definované:

$$Re = \frac{\rho_a \cdot l \cdot |\vec{v}_B - \vec{v}_a|}{\mu_a} \quad (2.26)$$

kde je l charakteristický rozmer, μ_a dynamická viskozita vzduchu.

V závislosti koeficientu odporu na Reynoldsovom čísle boli odvodené empirické vzťahy pre koeficient odporu nasledovne:

Pre $Re \leq 4,5 \times 10^5$ (laminárne prúdenie):

$$C_D = 0,47 + \frac{24}{Re + 0,01} \quad (2.27)$$

Pre $Re > 4,5 \times 10^5$ (laminárne prúdenie):

$$C_D = 0,3 \quad (2.28)$$

Rovnice nezahŕňajú zmenu tvaru balóna počas letu, preto korektúru zahrnuli do Reynoldsovho čísla pozdvihnutím hranice prechodu laminárneho do turbulentného prúdenia na hodnotu $4,5 \times 10^5$.

2.4.3 Sily pôsobiace na balón v horizontálnom smere

Sily pôsobiace v horizontálnom smere sú zväčša zanedbateľne malé, a to z dôvodu, že balónový systém sa pohybuje v relatívnom pokoji voči atmosfére, tzv. sa nechá unášať vetrom.

Môže dochádzať ku zdvihu (\vec{L}_a), kedy sa účinok okamžitej sily pôsobiacej na balón zo strany, premietne do vertikálneho smeru. Bočný zdvih definujeme:

$$\vec{L}_a = \frac{1}{2} \vec{k} \cdot C_L \cdot \rho_a \cdot A_L \cdot |\vec{v}_B - \vec{v}_a|^2 \quad (2.29)$$

kde C_L zdvihový koeficient, A_L je efektívna plocha prierezu balóna, kolmá na vektor zdvihu. Zdvih je pomerne viac náchylnejší na zmenu tvaru ako C_D . Význam zdvihu je najmä v stratosfére, kde môže byť vertikálny vplyv vetrov dostatočne veľký, taktiež účinok povrchu zeme v blízkosti balóna môže byť tiež dôležitý pre aerodynamické správanie balóna, a to vyvolávaním turbulencií.

2.5 Rovnica vertikálneho pohybu

Pohybová rovnica pre balónový systém s voľným zdvihom, pohybujúcim sa v atmosfére, môže byť odvodená z druhého Newtonového zákona:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (2.30)$$

Pre účely letu, môže byť prepísaná:

$$\vec{F}_f + \vec{F}_D + \vec{L}_a = m_v \frac{d\vec{v}_g}{dt} \quad (2.31)$$

Po dosadení rovníc (2.23), (2.24), (2.25) a (2.29) získame výslednú všeobecnú rovnicu vertikálneho zrýchlenia:

$$\begin{aligned} & -g \cdot \vec{k} \cdot \left\{ m_G + m_g \left[1 - \frac{M_a P_a (T_a + \Phi)}{M_g T_a (P_a + \pi)} \right] \right\} \\ & - \frac{1}{2} \cdot \rho_a \{ C_D \cdot A_D \cdot |\vec{v}_B - \vec{v}_a| \cdot (\vec{v}_B - \vec{v}_a) \\ & - \vec{k} \cdot C_L \cdot A_L \cdot |\vec{v}_B - \vec{v}_a|^2 \} \\ & = \left\{ m_G + m_g \cdot \left(1 + C_B \cdot \frac{M_a p_a (T_a + \Phi)}{(p_a + \pi) T_a M_g} \right) \right\} \frac{d\vec{v}_B}{dt} \end{aligned} \quad (2.32)$$

keďže $\Phi, T_a, C_L, C_D, \pi, P_a, A_D, A_L$ sú funkciou nadmorskej výšky, času a charakteristiky prostredia, je veľmi zložitý riešiť analyticky rovnicu (2.32), pre tento účel vznikli mnohé online softvérové simulátory, ktoré obsahujú všetky atribúty potrebné pre výpočet výstupnej rýchlosti. Výpočet priemernej výstupnej rýchlosti budeme riešiť v kapitole 2.6.

2.6 Simulácia balónového letu

Pre zjednodušenie riešenia všeobecnej rovnice (2.32) popisujúcej let, boli zhotovené mnohé softvérové simulátory. Softvéry môžu mať prístup k aktuálnym meteorologickým prognózam, ktoré taktiež implementujú do samotných výpočtov. Jednotlivé online softvéry spolupracujú s rôznymi firmami, vyrábajúcimi komponenty pre stratosférické lety, ako sú napríklad samotné latexové balóny alebo padáky. Zložitú charakteristiku následne môžu implementovať do výpočtov a konečnému užívateľovi výrazne uľahčiť výpočty dynamiky letu.

2.6.1 Výber balónu pre simuláciu

Pre výpočet priemernej rýchlosti výstupu, sme zvolili do výpočtového modelu balón HAB 1200 od firmy Kaymont Consolidated Industries, ktorá je najväčším distribútorom latexových balónov na svete a poskytuje vedeckej komunite vysoko kvalitné balóny už viac ako 30 rokov. Balóny Kaymont boli používané americkým vesmírnym programom viac ako 15 rokov a taktiež sú využívané národnou meteorologickou službou na dennej báze.[3]

Balón HAB 1200 patrí do triedy väčších balónov. Balóny HAB sú používané vo veľkých výškach t.j. 30 km a vyššie, sú vysoko spoľahlivé a odolné vo všetkých nadmorských výškach používania, ďalej si zachovávajú počas letu svoj guľatý tvar. Pri správnom používaní dosahujú hodnotu burst altitude (výšku prasknutia balóna) uvedenú výrobcom s maximálnou výchylkou 5 %. Najlepšie výsledky dosahuje balón HAB 1200 pri záťaži nákladu 900 - 1800 g a pri správnom naplnení zdvihovým plynom môžu dosahovať rýchlosť výstupu až 7 m.s^{-1} . Typické dosiahnuté výšky so stanoveným nákladom dosahujú 35000 m. Cena zvoleného modelu balóna sa pohybuje okolo 75 € za kus.[3]

Špecifikácia balóna HAB 1200 uvedené výrobcom:

Diameter výbuchu	Šírka krku	1kg nákladu	2kg nákladu
8,63 m	0,03 m	33,5 km	31,2 km

tab. 2-3

Vlastnosti latexového balóna Kaymont HAB 1200.



obr. 2-3 Obrázok priebehu explózie balóna Kaymont HAB 1200g.[25]

2.6.2 Výber modelu padáka pre simuláciu

Pre simuláciu letu balóna sme zvolili model padáku Rocketman 3ft. od firmy Rocketman Parachutes. Firma Rocketman Parachutes navrhuje a vyrába padáky, ktoré sa používajú na spomalenie dopadu užitočného nákladu z veľkých výšok. Padáky sa dodávajú so slučkou šitou na vrchole plášťa padáku, ktorá sa používa na pripevnenie k základni balóna. Cena zvoleného modelu padáku sa pohybuje v cene okolo 35 € za kus.

Špecifikácia padáku Rocketman 3ft. uvedené výrobcom:

Váha padáku	Rýchlosť klesania pri váhe užitočného nákladu 0,8 kg	Rýchlosť klesania pri váhe užitočného nákladu 1 kg	Rýchlosť klesania pri váhe užitočného nákladu 1,3 kg
70 g	4,6 m.s ⁻¹	5 m.s ⁻¹	6 m.s ⁻¹

tab. 2-4

Vlastnosti padáku Rocketman 3ft.



obr. 2-4 Obrázok padáku Rocketman 3ft.[4]

2.6.3 Výpočtový model softvérom Balloon Burst Calculator

Balloon Burst Calculator bol vyvinutý univerzitou v Cambridge. Jedná sa o free softvér licenciou GNU General Public . HTML a javascript bol vytvorený Adamom Greigom a Rossenom Georgievom v roku 2010, kedy bola vydaná prvá verzia softvéru v spolupráci s firmou Kaymont Consolidated Industries, ktorá poskytla parametre svojich balónov. Softvér nám poskytne dáta o priemernej rýchlosti výstupu, maximálnej dosiahnutej výške, čistý zdvih balóna a potrebný objem zdvihového plynu.

Rozhranie softvéru Balloon Burst Calculator:

The image shows the Balloon Burst Calculator web interface. It is divided into several sections: Input, Target, Result, and Constants (Advanced). Numbered arrows point to specific fields:

- 1. Payload Mass (g): 1100
- 2. Balloon Mass (g): Kaymont - 1200
- 3. Target Burst Altitude (m): (empty)
- 4. Target Ascent rate (m/s): 5
- 5. Result section showing: Burst Altitude: 33071 m, Ascent Rate: 5.00 m/s
- 6. Result section showing: Time to Burst: 110 min, Neck Lift: 2382 g
- 7. Result section showing: Volume: 3.49 m³, 3490 L, 123.2 ft³
- 8. Constants (Advanced) section: Gas: Helium
- 9. Constants (Advanced) section: Air Density (kg/m³): 1.2050
- 10. Constants (Advanced) section: Gas Density (kg/m³): 0.1786
- 11. Constants (Advanced) section: Air Density Model: 7238.3
- 12. Constants (Advanced) section: Burst Diameter (m): 8.63
- 13. Constants (Advanced) section: Balloon Cd: 0.3
- 14. Constants (Advanced) section: Gravitational Acceleration (m/s²): 9.80665
- 15. Constants (Advanced) section: (empty field)
- 16. Constants (Advanced) section: (empty field)

obr. 2-5 Obrázok popisujúci jednotlivé okná v ballonn burst calculator.[6]

Zadané parametre letu:

1. Hmotnosť užitočného nákladu m_l .
2. Hmotnosť balóna vrátane plášte, nosnej časti a ventilu m_B . Nami zvolený model balónu má hmotnosť 1200 g bez zdvihového plynu, údaj výrobcu.
3. Požadovaná výška, pri ktorej dôjde k explózii balónu.
4. Požadovaná priemerná rýchlosť výstupu. Pri výpočtoch si volíme z požadovanej dosiahnutej výšky alebo požadovanej dosiahnutej rýchlosti výstupu.

Výsledky:

5. Dosiahnutá výška, pri ktorej dôjde k explózii balónu.
6. Dosiahnutá priemerná rýchlosť výstupu.
7. Približná doba výstupu, po ktorej dôjde k explózii balónu.
8. Čistý zdvih balóna, určuje koľko zdvihu má balón pri naplnení nižšie uvedeným objemom. Ak sa k balónu pripojí závažie o tejto hmotnosti, balón bude nehybne visieť vo vzduchu bez toho, aby stúpал alebo klesal.
9. Objem zdvihového plynu na dosiahnutie požadovaných parametrov letu.

Konštanty:

10. Typ použitého zdvihového plynu. Pre náš projekt sme zvolili hélium He.
11. Hustota zdvihového plynu.
12. Hustota okolitého vzduchu.
13. Model zmeny hustoty okolitého vzduchu zmenou nadmorskej výšky.
14. Maximálny priemer balóna, po prekročení hodnoty dochádza k explózii balóna.
15. Koeficient odporu, pre stratosférické balóny sa priemerná hodnota počas výstupu pohybuje medzi 0,1 až 0,3. Výrobca odporúča použiť hodnotu 0,3.
16. Priemerné gravitačné zrýchlenie zeme počas výstupu.

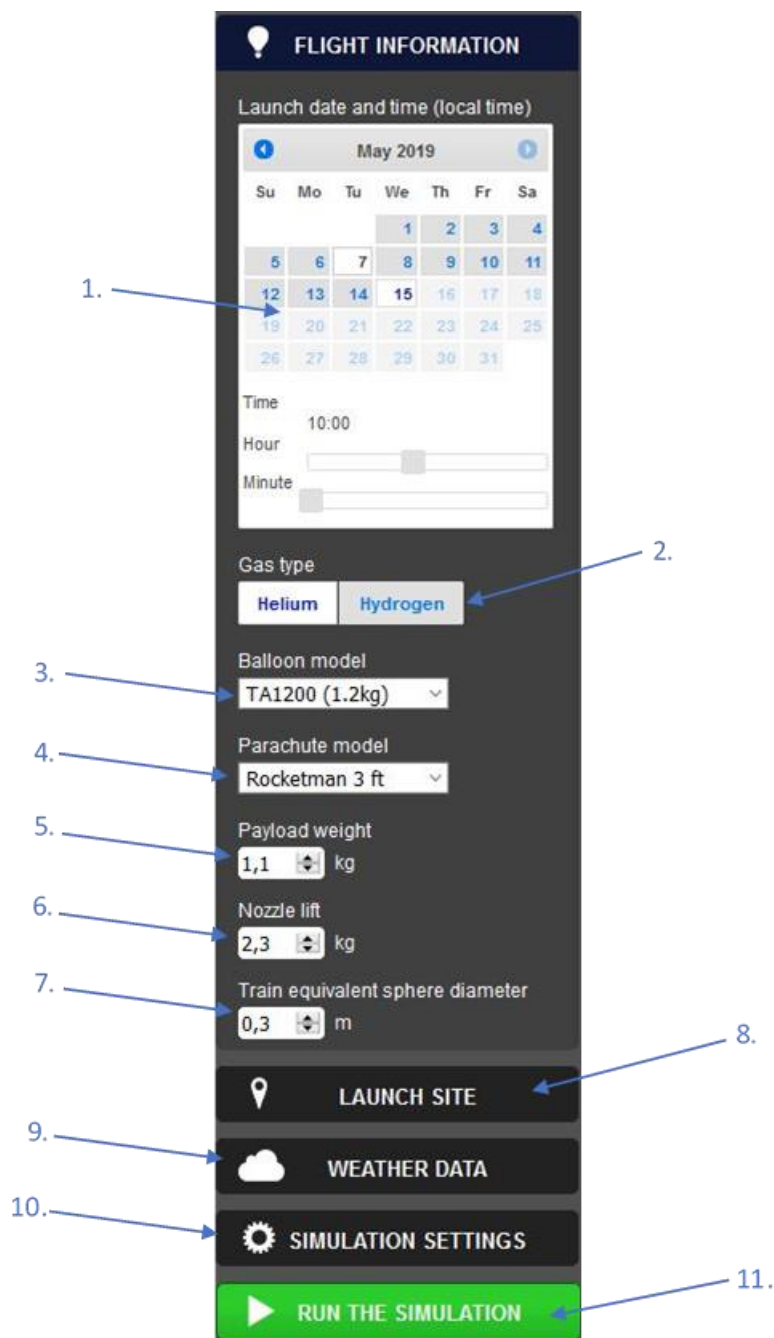
2.6.4 Simulačný model softvérom High Altitude Balloon Flight Planner

High Altitude Balloon Flight Planner bol vyvinutý univerzitou v South Hampton. Softvér simuluje let latexového plynového balóna v atmosfére Zeme. Základný matematický model je numericky aproximovaný pomocou Livermore Solver pre obyčajné diferenciálne rovnice. Atmosférické podmienky sú založené na prognóze americkej Národnej správy oceánov a atmosféry.[7]

Pri simulácii môže dochádzať k mnohým zdrojom nepresností, ktoré ovplyvňujú výsledky simulácie. Na označenie súvisiacich chybových rozpätí sa používa postup Monte-Carlo, ktorý spracováva a vyhodnocuje parametre, ktoré sú následne implementované na zmenu v simulácii. Tieto parametre sú: koeficient odporu balóna, zvyšky balóna, ktoré ostanú pripojené k vaku užitočného nákladu pri zostupe, koeficient ťahu padáku, maximálny priemer balóna pred explóziou.[7]

Softvér nám poskytne približnú predstavu vzdialenosti doletu z miesta vypustenia, v závislosti na počasí v okolí Brna.

Rozhranie softvéru Balloon Burst Calculator :



obr. 2-6 Obrázok užívateľského prostredia.[7]

1. Dátum simulácie.
2. Druh zdvihového plynu.
3. Model a váha balóna (použitý model TA1200, ktorý je ekvivalentom balóna Kaymont HAB 1200g).
4. Model padáku.
5. Hmotnosť užitočného nákladu m_l .

6. Čistý zdvih balóna, určuje koľko zdvihu má balón pri naplnení nižšie uvedeným objemom. Ak sa k balónu pripojí závažie o tejto hmotnosti, balón bude nehybne visieť vo vzduchu, bez toho, aby stúpал alebo klesal.
7. Koeficient odporu. Pre stratosférické balóny sa priemerná hodnota počas výstupu pohybuje medzi 0,1 až 0,3. Výrobca odporúča použiť hodnotu 0,3.
8. Miesto vypustenia balóna.
9. Dáta o počasí americkej Národnej správy oceánov a atmosféry.
10. Nastavenia počtu paralelných simulácií a typ simulácií.
11. Spustenie simulácie.

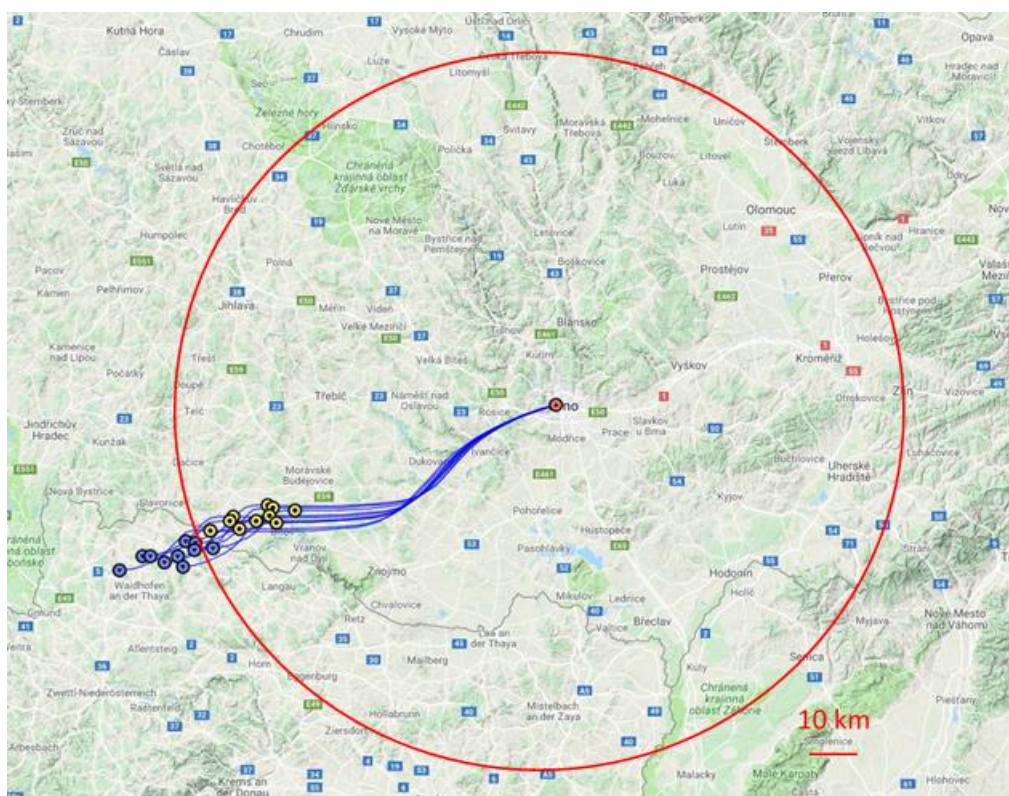
Simuláciu sme opakovali 3 krát po 10 paralelných simuláciách pre rôzne predpovede počasia. Výsledky simulácií sú znázornené v obr. 2-7, 2-8, 2-9.



obr. 2-7 Obrázok simulácie dňa 4.5. 2019.[7]



obr. 2-8 Obrázok simulácie dňa 1.5. 2019.[7]



obr. 2-9 Obrázok simulácie dňa 15.5. 2019.[7]

2.7 Zhrnutie výsledkov 2. kapitoly

Pre náš let budeme potrebovať 1200 gramový balón od výrobcu Kaymont, padák rocket man 3ft, maximálnu váhu užitočného nákladu 1100 gramov, 3490 litrov hélia. Za predpokladu, že balón bude vypustený s vyššie uvedenými komponentmi, bude priemerná rýchlosť výstupu a zostupu w , približne rovnaká, 5 m.s^{-1} . Maximálna dosiahnutá výška z_{max} bude približne 33 000 metrov, kedy dôjde k explózii balóna tzv. burst altitude a diameter pomyselnej kružnice očakávanej maximálnej vzdialenosti pristátia od miesta vypustenia bude približne 80 km . Tieto hodnoty budeme ďalej využívať pre výpočty v kapitole 3, venujúcej sa energetickej bilancii letu.

3 ENERGETICKÁ BILANCIA LETU

V tejto kapitole budeme určovať energetické pochody v sústave navrhovanej vyhrievanej komory a okolia, ktorým bude počas letu prechádzať. Tieto pochody sú silne závislé na priebehu rýchlostí vertikálneho výstupu a zostupu balónového systému počas letu, viz. kapitola 2.

Komora bude počas letu prekonávať dve vrstvy atmosféry. Prvou bude Troposféra, ktorej názov vznikol z gréckeho „tropos“ v preklade miešať. Troposféra siaha do výšky 7 km v polárnych častiach a až 18 km v rovníkovej časti sveta. Pre naše potreby výpočtov budeme uvažovať s výškou troposféry 9 km. V tejto sfére bude dochádzať k rapídному poklesu teplôt. Typickou vlastnosťou troposféry je výskyt oblačnosti a prípadnej vlhkosti. Druhou vrstvou atmosféry je Stratosféra. Jej výška siaha až do 60 km nadmorskej výšky. V tejto vrstve sa nachádza aj ozónová vrstva Zeme vo výške 25 až 35 km.[8]

Pre správny chod elektroniky, senzorov a napájacích batérií sme si určili konštrukčný cieľ, navrhnuť komoru s vyhrievaním, ktoré bude udržiavať v komore stabilných 20 °C, viz. kapitola 4.

Hlavné pojednávanie kapitoly 3 je výpočtovo zistiť na základe dynamických predpokladov letu z kapitoly 2 a charakteristiky atmosféry, množstvo tepla, ktoré komora odovzdá okoliu alebo naopak množstvo tepla odovzdané komore okolím. Tento jav môže vzniknúť na základe slnečného alebo infračerveného žiarenia v stratosfére.

3.1 Obmedzenia výpočtového modelu

Na zostrojenie funkčného výpočtového modelu energetickej bilancie budeme využívať softvér Microsoft Excel. Pri vytváraní modelového programu sa stretávame s niektorými problémami analytickej matematiky a s nedostatkom dát, hlavne v oblasti popisu niektorých vlastností vzduchu, ako funkciu nadmorskej výšky.

Z toho dôvodu si vytýčíme zjednodušenia vo výpočtoch. Výpočty budú prevádzané pre suchý ideálny plyn s rovnakými vlastnosťami cez deň a noc, stavová veličina tlak vzduchu vo vnútri komory bude rovnaká ako tlak vzduchu okolia.

Samotná komora nebude vykazovať žiadnu prácu W a zároveň ju **aproximujeme guľovou dutinou s vnútorným priemerom D_i a vonkajším priemerom D_o** , povrch pomyselnéj gule bude rovnako veľký ako povrch reálneho modelu komory.

Energetické modely letu budeme prevádzať pre extrémne scenáre t.j. noc, kedy nemá solárne žiarenie vplyv na komoru, ďalej deň kedy solárne žiarenie vplýva na povrch komory maximálne, vtedy žiarenie dopadá kolmo na zem a zvierá s normálou zemského povrchu uhol θ rovnajúci sa nule viz. kapitola 3.5.3. Posledný scenár pojednáva o ideálnom lete cez deň, kedy sa komora ukrýva v tieni balóna a jediný prírastok energie od balóna je solárne žiarenie odrazené od zeme a atmosféry s intenzitou približne 34 %. [9.]

3.2 Základná rovnica tepla

Základnú rovnicu pre energetickú bilanciu komory odvodíme z prvého zákona termodynamiky, ktorý prvýkrát vyjadril R. Mayer v roku 1842. Zákon hovorí o konzervatívnosti energie. Energia nemôže vznikáť ani zanikať, len meniť svoju formu. Prvý zákon termodynamiky je teda formulovaný nasledovne:

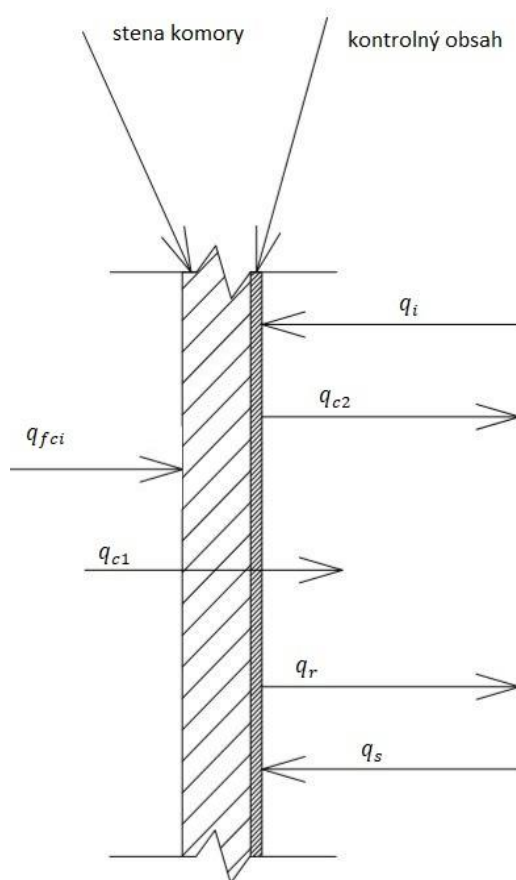
$$\Delta U = Q - W \quad (3.1)$$

kde ΔU je zmena vnútornej energie sústavy, Q je teplo dodané sústave a W je práca vykonaná sústavou, v našom prípade bude komora vykonávať jedinou prácu a to vyrovnávanie tlaku skrz tlakové ventily. Táto práca je však tak malá, že ju môžeme zanedbávať. [9]

Základnú rovnicu intenzity tepla prechádzajúceho kontrolným povrchom, za predpokladu konštantnej teploty vo vnútri komory, rozšírenú o pôsobenie vonkajšieho prostredia, si zdefinujeme pre smer prúdenia intenzity tepla z vonka do vnútra komory následne:

$$q_{fci} = q_{c1} = q_i + q_s - q_{c2} - q_r \quad (3.2)$$

Táto rovnica vyjadruje okamžitý stav energetickej rovnováhy v danom prostredí, a taktiež vyjadruje, že množstvo tepla prechádzajúceho vnútornou stenou komory, sa rovná teplu prechádzajúceho skrz komoru a vychádzajúceho z komory vonkajším povrchom.



obr. 3-1 Obrázok schémy prestupu tepla kontrolným povrchom.

kde q_i je množstvo tepla privedené na jeden meter štvorcový infračerveným žiarením, q_s je množstvo tepla privedené na jeden meter štvorcový solárnym žiarením, q_{c2} je množstvo tepla odvedeného na jeden meter štvorcový nútenou konvekciou medzi prostredím a povrchom komory, q_{c1} je množstvo tepla prevedené jedným metrom štvorcovým kondukciou t.j. prestupom tepla, ktoré prejde skrz steny komory,

q_r je množstvo tepla odvedeného sálaním (vlastnou emisivitou), jedným metrom štvorcový, a q_{fci} je množstvo tepla prevedeného medznou vrstvou vo vnútri komory, jedným metrom štvorcovým, voľnou konvekciou.

Keďže rovnica (3.2) vyjadruje okamžitý stav teplotnej bilancie sústavy a my potrebujeme pre výpočet totálnej tepelnej straty počas letu zadefinovať do výpočtu čas a úplný obsah celého povrchu našej komory, zadefinujeme si teda novú veličinu, hustota tepelného toku \dot{q} , ktorá vyjadruje, koľko tepla prejde jedným metrom štvorcovým za jednu sekundu.

Pre výpočet celkového tepelného toku \dot{Q}_c je potrebné prenásobiť celkovú hustotu tepelného toku \dot{q}_c , ktorý prejde plochou kontrolného povrchu komory, celkovým povrchom komory S_c :[10]

$$\dot{Q}_c = \dot{q}_c \cdot S_c \quad (3.3)$$

Rovnicu (3.2) preto môžeme prepísať do tvaru:

$$\dot{Q}_{fci} = \dot{Q}_{c1} = \dot{Q}_i + \dot{Q}_s - \dot{Q}_{c2} - \dot{Q}_r \quad (3.4)$$

Pre výpočet absolútneho tepla Q je treba rovnicu (3.4) prenásobiť dobou merania t .

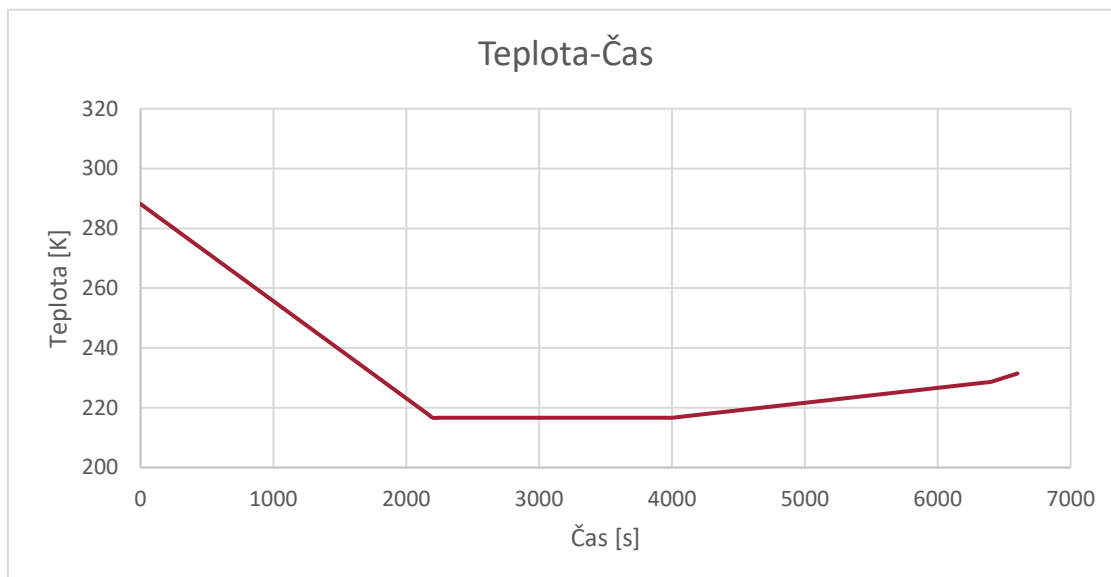
$$Q_{c1} = (\dot{Q}_i + \dot{Q}_s - \dot{Q}_{c2} - \dot{Q}_r - \dot{Q}_{fci}) \cdot t \quad (3.5)$$

Táto rovnica platí za predpokladu, že počas doby merania tepelného toku nebude dochádzať k variácii premenných. V realite však bude komora prekonávať rôzne meteorologické pásma s rôznymi tlakmi, teplotami, hustotami vzduchu atď. (tzv. charakteristiky atmosféry), ktoré budú ovplyvňovať jednotlivé tepelné toky v čase. Preto krivky charakteristík atmosféry v závislosti na čase, viz. kapitola 3.3, si diferencujeme na časové úseky po 40 sekundách, pre ktoré budeme uvažovať konštantné vlastnosti prostredia. Na výpočet absolútneho tepla Q budeme musieť poznať charakteristiky atmosféry na čase.

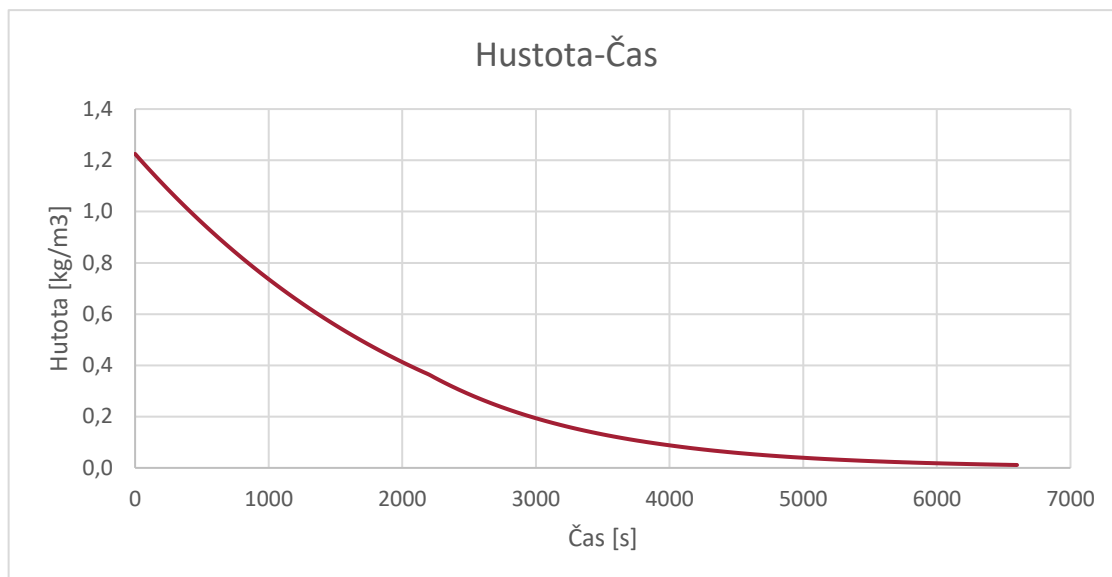
3.3 Charakteristika atmosféry na čase

Na zostavenie nasledujúcich grafov závislostí sme použili International standards atmospheric properties, ďalej len ISA. ISA je statický atmosférický model toho, ako sa mení tlak, teplota, hustota a viskozita zemskej atmosféry v rozsahu nadmorských výšok. Medzinárodná organizácia pre normalizáciu (ISO) vydáva ISA ako medzinárodnú normu, ISO 2533: 1975. [11]

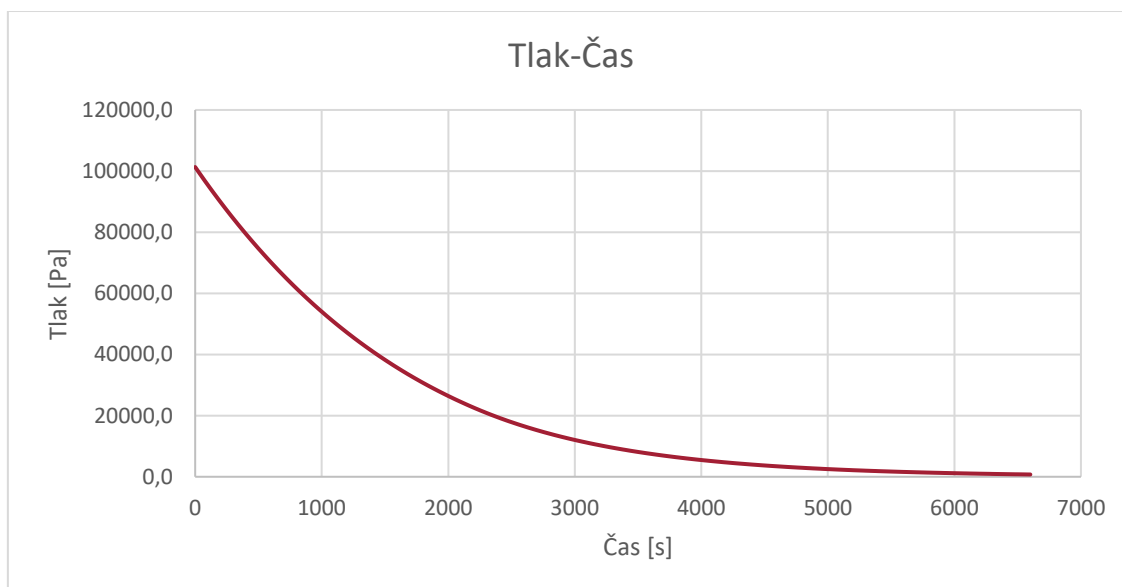
ISA normy sme si ďalej obmenili, podľa dynamických aspektov letu v kapitole 2, a závislosť na nadmorských výškach sme previedli na závislosťou na čase. Tieto charakteristiky nám vo veľkej miere uľahčia následné výpočty. Jednotlivé charakteristiky atmosféry v závislosti na čase letu opisujú nasledovné grafy:



obr. 3-2 Obrázok závislosti teploty vzduchu na čase.



obr. 3-3 Obrázok závislosti hustoty vzduchu na čase.



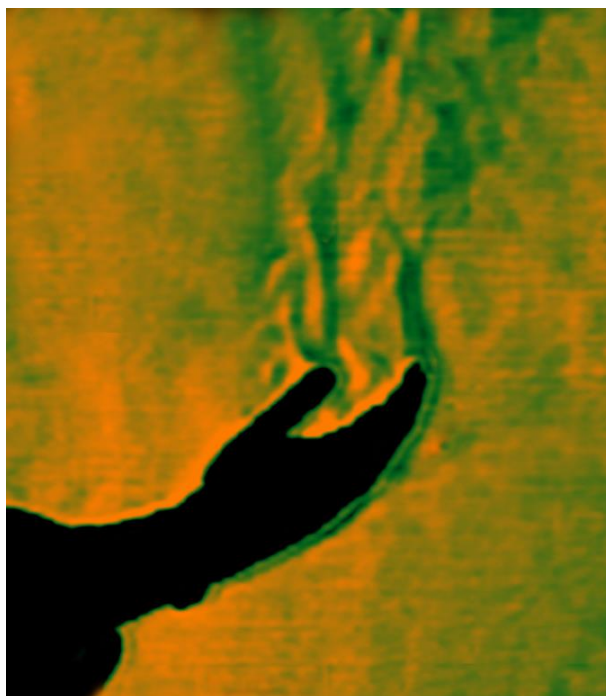
obr. 3-4 Obrázok závislosti tlaku vzduchu na čase.

3.4 Prenos tepla konvekciou

Konvekcia je jav prenosu tepla prenosom objemu tekutiny poprípade plynu (ďalej len fluidné médium) po povrchu pevnej látky. K pohybu fluidného média a prenosu tepla môže dochádzať dvoma spôsobmi. Voľnou a nútenou konvekciou. [12]

3.4.1 Voľná konvekcia

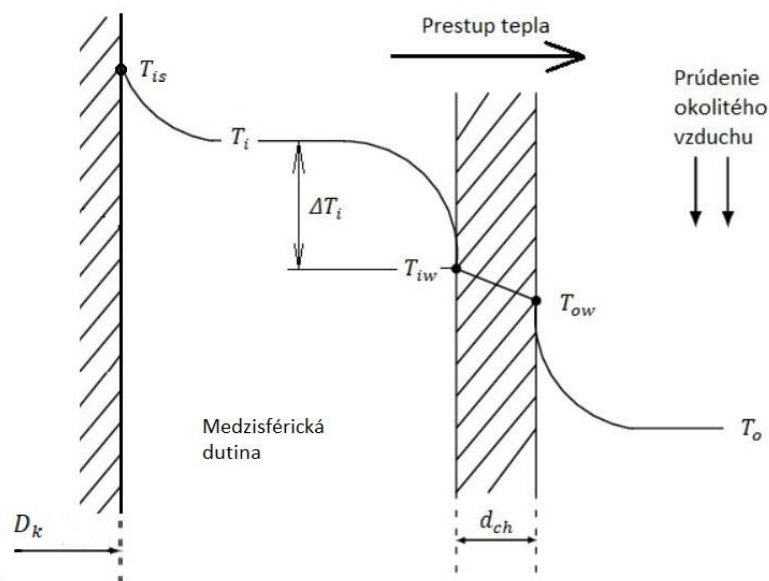
Voľná alebo aj prirodzená konvekcia je jav, ku ktorému dochádza zmenou hustoty vo fluidnom médiu, ktorá je spôsobená rôznymi teplotami v rôznych častiach fluidného média. Tieto zmeny vyvolávajú vztlakové sily, ktoré spôsobujú pohyb fluidného média pri povrchu inej teploty ako fluidné médium.[12]



obr. 3-5 Obrázok voľnej konvencie vzduchu ohrievaného ľudskou rukou.[26]

K voľnej konvexcii bude dochádzať vo vnútri komory. Komoru považujeme za uzavretú sústavu, a pohyb vzduchu v tejto sústave nemôže byť vyvolaný dynamickými vlastnosťami prúdenia vzduchu okolo komory, preto nebude dochádzať k nútenej konvexcii (viz. kapitola 3.4.2).

Jediný zdroj pohybu bude voľná konvekcia na rozhraní povrchu výhrevného telesa a povrchu vnútornej steny komory. Pre zložité modelovanie prenosu tepla voľnou konvekciou z výhrevného telesa na steny komory skrz vzduch vo vnútri, budeme k tejto problematike pristupovať nasledovne. Voľnú konvekciu na rozhraní: výhrevné teleso a vzduch zanedbáme a miesto neho si zdefinujeme sférický povrch konštantnej teploty $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ s priemerom D_k vo vnútri komory s priemerom D_i , tým pádom vznikne priestor v medzisférickej dutine, v ktorej bude dochádzať k voľnej konvekcii, spôsobenej rozdielmi teplôt povrchov stien.



obr. 3-6 Obrázok znázorňuje teplotnú degradáciu spôsobenú voľnou konvekciou.

kde T_{is} je teplota sférického povrchu vnútri komory, v našom prípade $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, T_i je teplota v medzisférickej dutine, T_{iw} je teplota na povrchu vnútornej steny komory, T_{ow} je teplota na povrchu vonkajšej steny komory, T_o je teplota okolitého vzduchu, d_{ch} je šírka steny komory, v našom prípade 3 cm, viz. kapitola 4.

Pri výpočte toku energie \dot{Q}_{fci} budeme postupovať nasledovne:

Na vyjadrenie vzťahu medzi vztlačovými silami, spôsobenými rozdielom teplôt jednotlivých objemov vzduchu v medzisférickom priestore a silami molekulárneho trenia vo fluidnom médiu, použijeme Grashofovo podobnostné číslo:

$$\text{Gr} = \frac{\gamma \cdot g \cdot l_s^3}{\nu^2} \cdot (T_{is} - T_{iw}) \quad (3.6)$$

kde γ je teplotná objemová rozťažnosť fluidného média, g je gravitačná konštanta, ν je kinematická viskozita fluidného média vo vnútri komory a l_s je charakteristický rozmer, v prípade koncentrických sférických plôch to je šírka medzisférickej dutiny, v našom prípade:

$$l_s = \frac{D_i - D_k}{2} \quad (3.7)$$

Súčiniteľ korekcie pre medzisférickú dutinu medzi dvoma koncentrickými plochami je daný pomerom l_s/D_k , ak sa súčiniteľ korekcie nachádza v rozmedzí 0,125 až 0,75 (v našom prípade 0,215) môžeme uvažovať s koeficientom tepelnej vodivosti ε_k nasledovne:

$$\varepsilon_k = 0,106 \cdot Gr^{0,276}$$

a ekvivalentnú tepelnú vodivosť zdefinujeme:

$$\lambda_{ekv} = \varepsilon_k \cdot \lambda_{str} \quad (3.8)$$

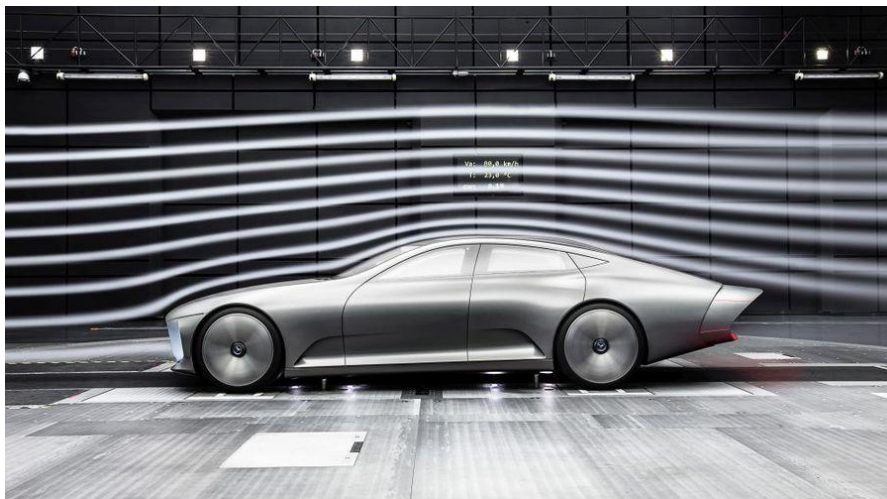
kde, λ_{str} je priemerná tepelná vodivosť. Následne vyjadríme tok tepla medzisférickou dutinou:

$$\dot{Q}_{fci} = 2 \cdot \pi \cdot \lambda_{ekv} \cdot \frac{D_k \cdot D_i}{D_i - D_k} \cdot (T_{is} - T_{iw}) \quad (3.9)$$

Všetky rovnice pre výpočet toku energie vnútro komory spôsobenou voľnou konvekciou boli vyjadrené za pomoci.[12],[13]

3.4.2 Nútená konvekcia

Nútená konvekcia je jav, ku ktorému dochádza obtekaním pevného telesa objemom fluidného média. Tieto objemy spôsobujú prestup tepla v medznej vrstve. Najvýznamnejšie podobnostné číslo nútenej konvekcie je Reynoldsovo číslo, ktoré vypovedá o pomere zotrvačných síl a síl molekulárneho trenia prúdu tekutiny.[12]



obr. 3-7 Obrázok nútenej konvekcie vzduchu pri obtekaní auta v aerotunely.[27]

K nútenej konvekcii bude dochádzať na povrchu komory, kde ju bude obtekať vzduch vo vertikálnom smere. Obtekanie spôsobuje pohyb balónovej sústavy voči statickej atmosfére.

Výpočet prestupu tepla vonkajším povrchom komory počas letu bude funkciou viacerých podobnostných čísel $\dot{Q}_{c2} = f(Re, Pr, Nu)$.

Re je Reynoldsovo číslo dané vzťahom:

$$Re = \frac{\rho \cdot w \cdot l}{\eta} \quad (3.10)$$

kde ρ je hustota vzduchu, w rýchlosť obtekania vzduchu, l je charakteristický rozmer (v našom prípade vonkajší priemer komory D_o) a η je dynamická viskozita vzduchu.

Pr je Prandtlovo číslo, vypovedá o podobnosti fyzikálnych vlastností fluidných médií. Je dané vzťahom:

$$Pr = \frac{c_p \cdot \eta}{\lambda} \quad (3.11)$$

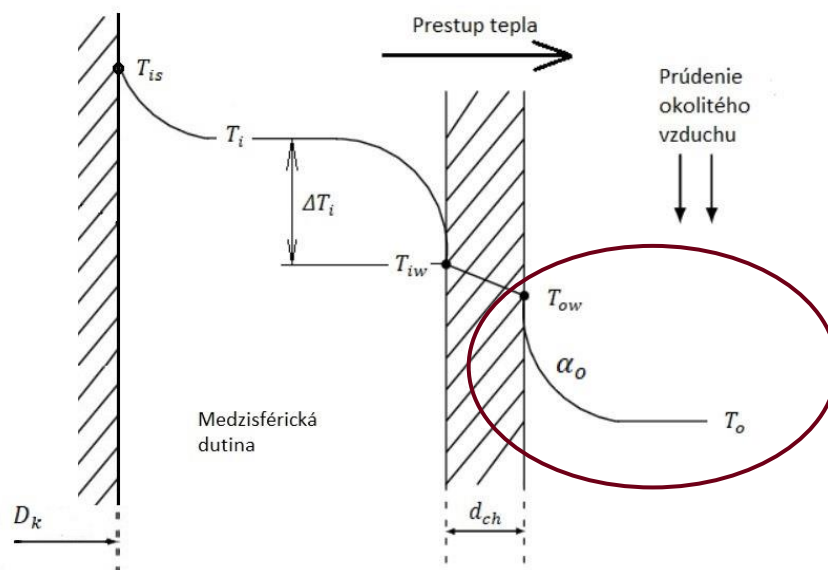
kde c_p je merná tepelná kapacita vzduchu, λ je súčiniteľ teplotnej vodivosti vzduchu (v našom prípade to bude konštantná hodnota 1000 [J/(kg.K)]).

Nu je Nusseltovo číslo, vypovedá o pomeroch medzi tepelnými odpormi pri prenose tepla vedením a konvekciou v medznej vrstve fluidného média na povrchu pevného telesa. Je funkciou $Nu = f(Re, Pr)$ v prípade obtekania sférických plôch uvádza Ranz a Marshal, vo svojich literatúrach [7, 8], nasledujúcu rovnicu:[12]

$$Nu = 2 + 0,6 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad (3.12)$$

Rovnica platí v rozmedzí Re od 0 do 1000, zároveň nesmie fluidné médium prekročiť 200°C .

Na výpočet tepelného toku \dot{Q}_{c2} vonkajším povrchom komory treba zadať vlastnosti prestupu v medznej vrstve, nato slúži tzv. súčiniteľ prestupu tepla α_o .



obr. 3-8 Obrázok znázorňuje teplotnú degradáciu spôsobenú nútenou konvekciou.

Súčiniteľ prestupu tepla α_o je definovaný:

$$\alpha_o = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} \quad (3.13)$$

Tok tepla nútenou konvekciou \dot{Q}_{c2} medzi okolitým vzduchom a vonkajším povrchom komory je teda definovaný:

$$\dot{Q}_{c2} = \alpha_o \cdot S_c \cdot (T_{ow} - T_o) \quad (3.14)$$

Všetky rovnice pre výpočet toku energie vonkajším povrchom komory spôsobenou nútenou konvekciou boli vyjadrené za pomoci. [12], [13], [14]

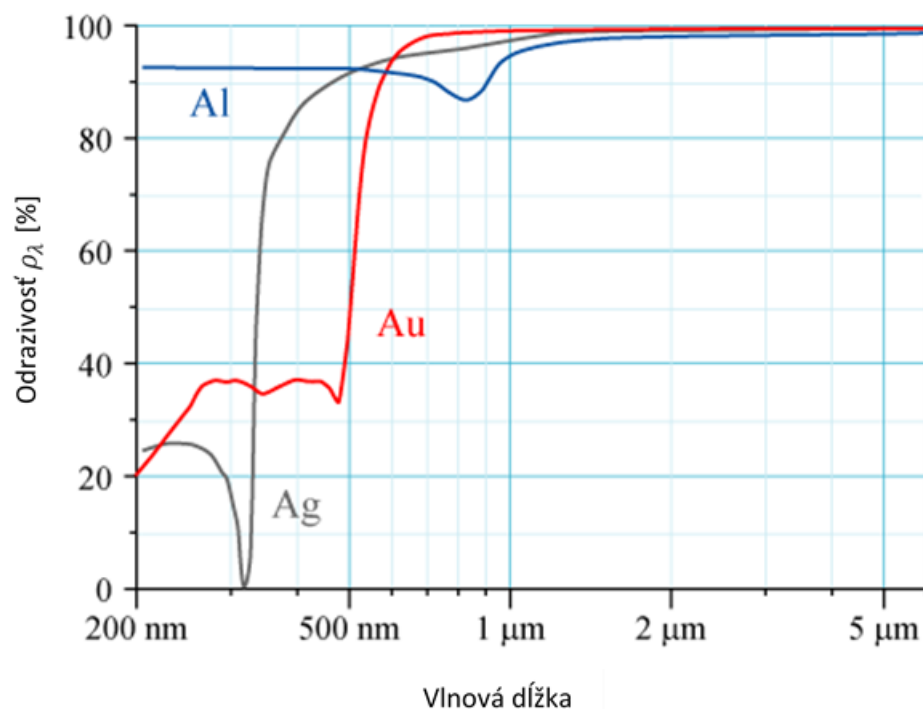
3.5 Prenos tepla žiarením

Pri lete balóna do stratosféry bude pôsobiť na komoru nepretržité slnečné žiarenie, buď priame žiarenie alebo odrazené žiarenie od zeme, poprípade od atmosféry. Viac ako 99% slnečného žiarenia je v rozsahu vlnových dĺžok medzi 0,2 až 4,0 μm , zatiaľ čo žiarenie spôsobené zemským povrchom a atmosférou je v infračervenom pásme s vlnovými dĺžkami medzi 6 až 100 μm , pričom približne až 70% tohto žiarenia je pod hranicou 20 μm . Ďalej samotná komora tiež emituje vlastné žiarenie. Pri dopade žiarenia na komoru sa časť žiarenia odrazí ρ_λ , časť pohltí obal komory α_λ a časť žiarenia sa prepustí τ_λ . V našom prípade je však povrchová fólia na povrchu komory natoľko tenká, že predpokladáme, že všetko neodrazené žiarenie prepustí. Pohltivosť α_λ teda zanedbáme.

$$\tau_\lambda + \rho_\lambda = 1 \quad (3.15)$$

τ_λ a ρ_λ sú materiálové charakteristiky, ktoré hovoria, koľko percent dopadajúceho žiarenia o rôznych vlnových dĺžkach sa odrazí od povrchu daného materiálu, podľa zákona o odraze, a koľko percent prejde skrz povrchom komory.[9]

Pre ochranu komory pred žiarením sa komora obalí do hliníkovej fólie, ktorá je pre svoju nízku cenu a váhu, a zároveň má veľmi dobré odrážacie vlastnosti, znázornené v nasledujúcom obrázku 3-9 najlepším variantom.



obr. 3-9 Obrázok znázorňuje odrazivosť hliníku (Al), zlata (Au) a striebra (Ag).[28]

Podľa obrázku 3-9 môžeme konštatovať, že schopnosť hliníku je odrážať v priemere až 93 % slnečného žiarenia a 98 % infračerveného žiarenia.

Množstvo žiarenia prijatého a emitovaného silne závisí na čase vypustenia balóna. Pri dopade žiarenia kolmo na povrch, je absorpcia žiarenia výrazne vyššia, ako pri dopade žiarenia pod uhlom, kedy musí žiarenie prekonať dlhšiu dráhu skrz atmosféru, ktorá žiarenie oslabuje, t.j. táto zmena uhla má výrazný vplyv najmä v ranných hodinách pri východe slnka, kedy je uhol približne 90° a klesá až do poobedňajších hodín, kedy je intenzita žiarenia najvyššia, ale zároveň môže komora zotrvať v tieni balóna (viz. kapitola 2.6.3).

Vo výškach menších ako približne 9 km (v rozmedzí troposféry) je množstvo žiarenia dopadajúceho na komoru závislé na počasí v daný deň letu. Množstvo infračerveného žiarenia dopadajúceho na komoru zdola a zhora sa bude značne líšiť na práve už spomínanom počasí a oblačnosti.

Dopadajúce slnečné žiarenie bude taktiež závisieť od nadmorskej výšky a oblačnosti. Vo výškach nad približne 9 km sa balón dostáva do sféry, kde počasie už nemá vplyv na žiarenia a vplyv žiarení sa prejaví na maxime, najmä infračervené žiarenie. Za týchto podmienok sa dá určiť infračervené žiarenie s väčšou presnosťou. Pre vyššiu mieru presnosti aplikácie výpočtu energetickej bilancie komory počas letu sa odporúča vypúšťať stratosférický balón za priaznivých podmienok bez oblačnosti.

3.5.1 Rovnica toku energie vlastnou emisivitou \dot{Q}_r

Vlastná emisivita alebo tiež tepelné žiarenie je jav, ktorý popísali ako prví v roku 1879 Ludwig Boltzman a Josef Stefan. Popisuje celkovú intenzitu žiarenia absolútne čierneho telesa, ktoré je ideálnym telesom pre úplné pohltenie alebo úplné vyžarovanie všetkých vlnových dĺžok. Stefan-Boltzmanov zákon hovorí, že vlastná emisivita rastie so štvrtou mocninou povrchovej teploty daného telesa, v našom prípade povrch komory.[15]

Pri aplikácii Stefan-Boltzmanovho zákona na komoru dostaneme vzťah:

$$\dot{Q}_r = S_o \cdot \sigma \cdot T_{ow}^4 \quad (3.16)$$

kde, σ je Stefan-Boltzmanova konštanta, T_{ow} je teplota povrchu komory a S_o je povrch komory. Pre zložité implementovanie do výpočtového modelu a veľmi malému toku energie do okolia komory, vlastnú emisivitu zanedbáme.

3.5.2 Rovnica toku energie infračerveným žiarením \dot{Q}_i

Príspevok k celkovému tepelnému zaťaženiu komory tepelným infračerveným žiarením zo zeme a atmosféry je dôležitou premennou v rovnici (3.5). Táto časť celkovej tepelnej záťaže je však vystavená veľkej výpočtovej nepresnosti z dôvodu veľkej variácií možností počasia v daný deň letu. Infračervené žiarenie zo zeme a atmosféry je taktiež silne ovplyvnené výškou, v ktorej sa balón nachádza.

Pre zložitý popis infračerveného žiarenia odrazeného od zeme a atmosféry, si zvolíme niekoľko aproximácií. Dopadajúce infračervené žiarenie si rozdelíme do štyroch smerov podľa dopadu na komoru: zdola, zhora a z dvoch bočných strán. Každá strana bude mať obsah priemeru pomyslenej gule S_{po} nahradzujúci model reálnej komory, teda:[9]

$$S_{po} = \frac{\pi \cdot D_o^2}{4} \quad (3.17)$$

kde, D_o je vonkajší priemer pomyslenej gule.

Pri dopadaní infračerveného žiarenia na komoru, môže dochádzať k dvom variantom počasia.

Prvý variant hovorí o lete balóna v oblačný deň, vtedy si let rozdelíme do dvoch fáz. Fáza letu pod vrstvou oblačnosti a fáza letu nad vrstvou oblačnosti. Ako zdroj infračerveného žiarenia si zadefinujeme vrstvu oblakov, ktorá bude pôsobiť na komoru zhora pri lete pod oblakmi a zdola pri lete nad oblakmi podľa vzťahu (3.18), pričom na opozitnú stranu komory bude pôsobiť hustota infračerveného žiarenia \dot{q}_{io} podľa tabuľky 2-1. Vzťah pre výpočet toku energie infračerveného žiarenia emitovaného z oblakov:

$$\dot{Q}_{ic} = S_{po} \cdot \sigma \cdot T_c^4 \quad (3.18)$$

kde, \dot{Q}_{ic} je tok radiačnej emisivity oblakov, pôsobiaca na vertikálne orientovanú plochu S_{po} , σ je Stefan-Boltzmanova konštanta a T_c je priemerná teplota oblakov, ktorú budeme určovať podľa teploty prostredia vo výške, v ktorej sa oblaky budú nachádzať.

Druhým variantom je let v bezoblačný deň, v takom prípade intenzitu žiarenia v závislosti na výške zadefinujeme nasledovne:[9]

Smer dopadajúceho žiarenia \dot{q}_{io}	Výškové rozpätie < 10km	Výškové rozpätie 10-15 km	Výškové rozpätie >15 km
zdola	35 W/m ²	40 W/m ²	45 W/m ²
zhora	40 W/m ²	20 W/m ²	10W/m ²

tab. 3-1

Hustota žiarenia \dot{q}_{io} pôsobiaca na komoru vo vertikálnom smere.

Pre výpočet toku dopadajúceho žiarenia \dot{Q}_{io} stačí v danom výškovom rozmedzí prenásobiť intenzitu radiácie plochou S_{po} .

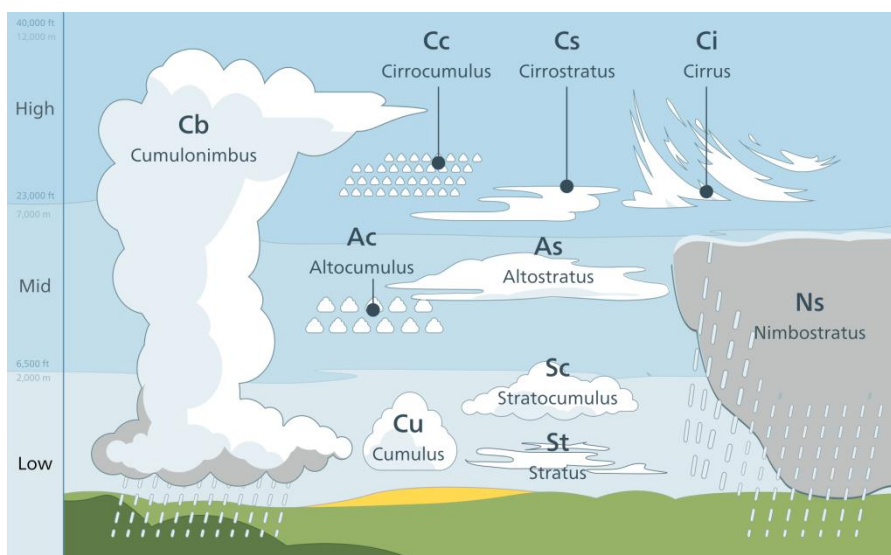
Infračervené žiarenie zo strán môžeme nahradiť žiarením dokonale čierneho telesa obklopujúceho komoru o teplote prostredia v aktuálnej výške komory počas letu. Pre výpočet použijeme obdobu rovnice (3.18):

$$\dot{Q}_{is} = S_{po} \cdot 2 \cdot \sigma \cdot T_a^4 \quad (3.19)$$

kde, \dot{Q}_{is} je tok radiačnej emisivity okolitého prostredia, pôsobiacej na dve horizontálne orientované plochy S_{po} , σ je Stefan-Boltzmanova konštanta, T_a je teplota okolitého vzduchu v okamžitej výške balónového systému počas letu. Celková hodnota toku infračerveného žiarenia plochou komory je daná súčtom všetkých rôzne orientovaných zložiek infračerveného žiarenia:

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_{io} + \dot{Q}_{ic} + \dot{Q}_{is} \quad (3.20)$$

Keďže výškové rozdiely pre rôzne typy oblačnosti sú enormné a nevieme určiť aké počasie bude v deň letu, budeme zostavovať základný energetický model výstupu komory pre bezoblačné počasie, následne môžeme výpočty podľa meteorologických správ dodatočne upraviť pred samotným vypustením balóna.

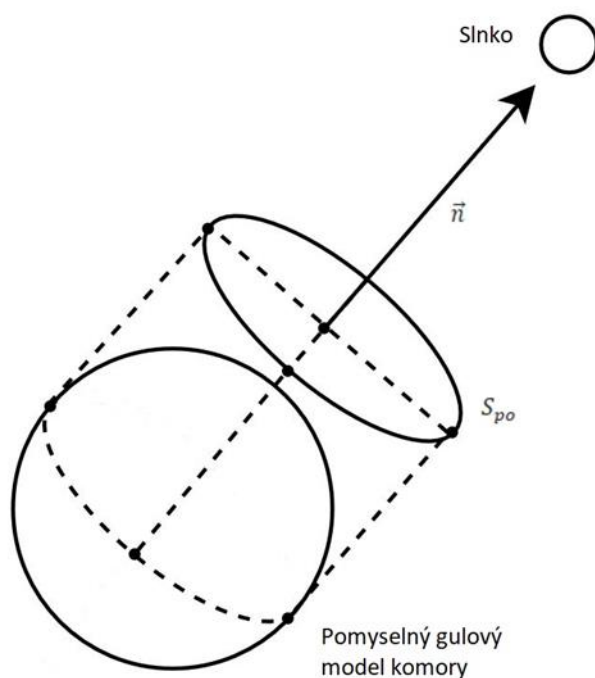


obr. 3-10

Obrázok znázorňuje rôzne typy oblačnosti.[29]

3.5.3 Rovnica toku energie priamym solárnym žiarením \dot{Q}_s

Viac ako 99% slnečnej radiácie je v rozmedzí vlnových dĺžok medzi 0,2 a 4 μm . Priame slnečné žiarenie aproximujeme absolútne čiernym telesom o teplote blízkej teplote slnka, teda 5550 K. Hustota slnečného žiarenia \dot{q}_{sd} , mimo atmosféry, dopadajúceho kolmo na povrch je teda 1395 W/m². V našom prípade bude kolmou plochou, k solárnemu žiareniu, okamžitá plocha S_{po} určená normálou \vec{n} .

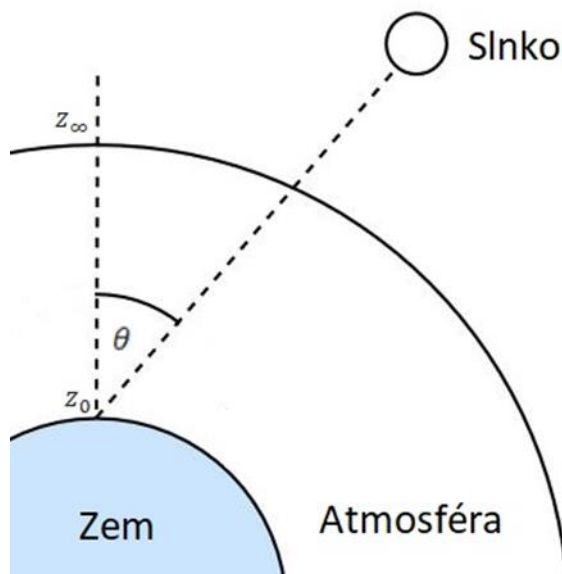


obr. 3-11 Obrázok znázorňuje okamžitú orientáciu plochy S_{po} .

Pri prechode solárneho žiarenia cez atmosféru sa intenzita a spektrum žiarenia mení absorpciou a rozptylom o prostredie, ktorým prechádza. Žiarenie je silne závislé najmä od dĺžky dráhy slnečných lúčov prechádzajúcich atmosférou, zvyčajne vyjadrenou ako koeficient optickej vzdušnej hmotnosti AM_o . Keďže presné výpočty zoslabeného spektra žiarenia ako funkciu výšky a polohy voči slnku sú pomerne ťažkopádne, použijeme pre výpočet degradácie intenzity solárneho žiarenia, pri dopade na zemský povrch, empirický vzťah: [9], [10], [12]

$$\frac{\dot{q}_{s,m}}{\dot{q}_{sd}} = 1,1 \cdot 0,7^{(AM_o^{0,678})} \quad (3.21)$$

kde, $\dot{q}_{s,m}$ je degradovaná hodnota intenzity solárneho žiarenia a AM_o je koeficient optickej vzdušnej hmotnosti, ktorá je funkciou nadmorskej výšky z a uhlu dopadajúceho solárneho žiarenia θ .



obr. 3-12 Obrázok znázorňuje distribúciu priameho slnečného žiarenia pod uhlom θ .

koeficient optickej vzdušnej hmotnosti AM_o popisuje vlastnosti intenzity žiarenia pri prechode zemskou atmosférou. Je definovaná ako pomer relatívnej dĺžky ku dĺžke prechodu kolmej na zemský povrch. Je definovaný podľa Kasten a Young nasledovne: [16]

$$AM_{oam}(\theta) = \frac{1}{\cos\theta + 0,50572 \cdot (96,07995 - \theta)^{-1,6364}} \quad (3.22)$$

Pre zostrojenie modelu energetickej bilancie solárneho žiarenia počas letu budeme uvažovať dva prípady. Prvý prípad je let skoro ráno, kedy uhol θ dosahuje 90° pri východe slnka. Druhý prípad je let počas poobedňajších hodín, kedy uhol θ dosahuje 0° .

Tieň balóna zanedbáme, z dôvodu zistenia, že sa komora v extrémnych okrajových podmienkach nebude prehrievať.

Keďže rovnica (3.21) nie je funkciou nadmorskej výšky z , ale len uhlu θ , bola upravená pre potreby variácie nadmorskej výšky nasledovne:

$$\frac{\dot{q}_s}{\dot{q}_{sd}} = 1,1 \cdot \left[\left(1 - \frac{z}{7100} \right) \cdot 0,7^{(AM_o^{0,678})} + \frac{z}{7100} \right] \quad (3.23)$$

kde, \dot{q}_{sd} je hustota solárneho žiarenia, \dot{q}_s je degradovaná intenzita solárneho žiarenia v závislosti na nadmorskej výške z . Rovnica je použiteľná do $z=9$ km, po dosiahnutí 9 km si zadefinujeme plnú hustotu solárneho žiarenia 1395 W/m^2 . Pre tok energie solárneho žiarenia pre násobíme rovnicu (3.23) plochou S_{po} :

$$\dot{Q}_s = 1,1 \cdot \left[\left(1 - \frac{z}{7,1} \right) \cdot 0,7^{(AM_o^{0,678})} + \frac{z}{7,1} \right] \cdot S_{po} \cdot \dot{Q}_{sd} \quad (3.24)$$

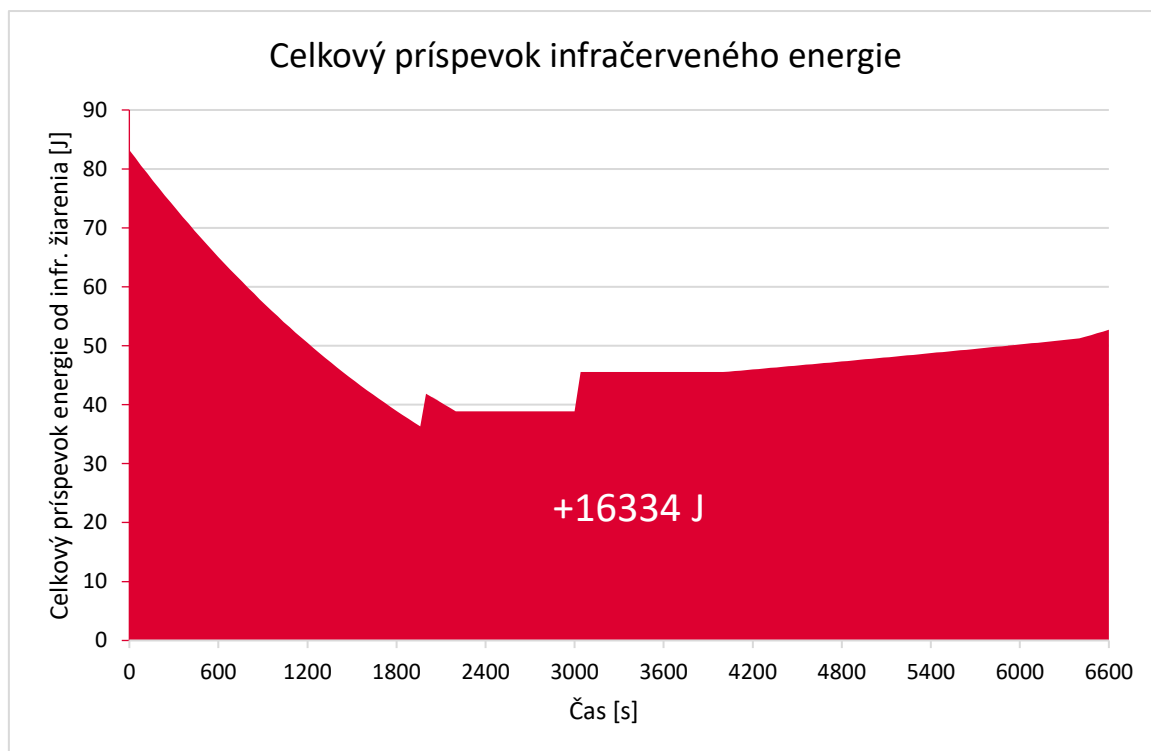
Všetky rovnice pre výpočet toku energie vonkajším povrchom komory spôsobenou vlastnou emisivitou, infračerveným a solárnym žiarením boli vyjadrené za pomoci. [12], [13], [17]

3.5.4 Výsledky energetickej bilancie letu

Jednotlivé úplné príspevky resp. úbytky energie z kontrolného povrchu komory vypočítané v softvéri Microsoft Excel pre výstup a zostup balónového systému sú nasledovné:

Infračervené žiarenie prispelo uzavretej sústave komory množstvom energie:

$2 \times 8167 = +16334$ Joule (Hodnoty násobíme 2 z dôvodu pomerne symetrickej charakteristiky letu pri zostupe balónového systému). Energie bola privádzaná v závislosti na čase nasledovne:



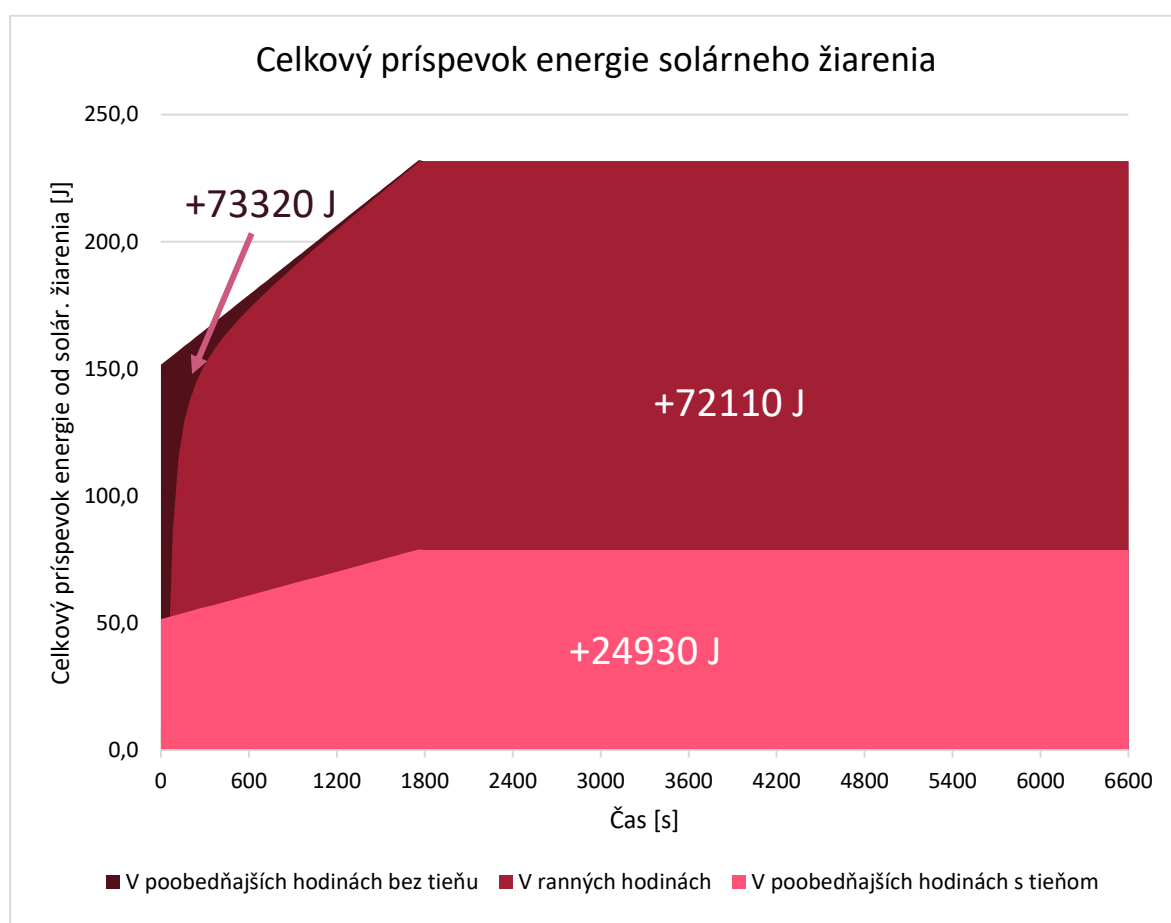
obr. 3-13 Obrázok znázorňuje distribúciu infračervenej energie v závislosti na čase.

Skoky spôsobené vo výpočtovom modeli sú zapríčinené aproximáciou infračerveného žiarenia dopadajúceho na komoru vo vertikálnom smere zhora a zdola. Túto aproximáciu sme si zaviedli v tab. 2-1.

Solárne žiarenie prispelo uzavretej sústave komory množstvom energie:

- a) Počas letu v noci $2 \times 0 = 0$ Joule.
- b) Počas letu v ranných hodinách $2 \times 36055 = +72110$ Joule.
- c) Počas letu v poobedňajších hodinách bez uvažovania tieňa balónu
 $2 \times 36660 = +73320$ Joule.
- d) Počas letu v poobedňajších hodinách s uvažovaním tieňa balónu
 $2 \times 12465 = +24930$ Joule.

Energia bola privádzaná v závislosti na čase nasledovne:

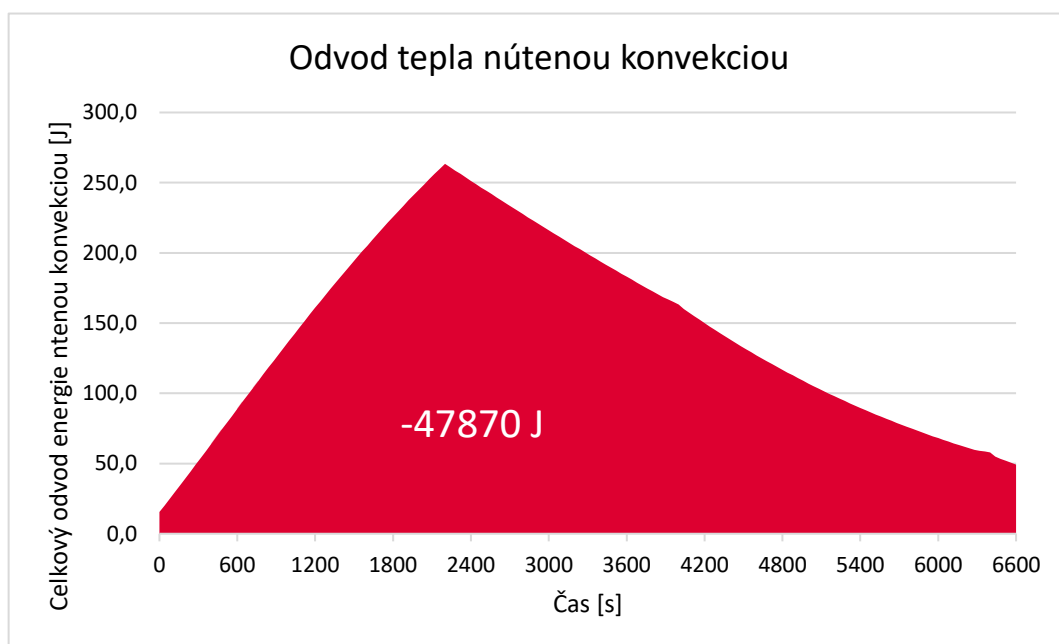


obr. 3-14 Obrázok znázorňuje distribúciu solárnej energie v závislosti na čase.

Skoky spôsobené vo výpočtovom modeli sú zapríčinené uvažovaním úplného pôsobenia solárneho žiarenia dopadajúce na komoru od > 9 km, uvažovaním, že troposféra má minimálny vplyv na žiarenie a jeho degradáciu.

Teplo odvedené z uzavretej sústavy komory do okolia nútenou konvekciou má hodnotu:

$2 \times 23935 = -47870$ Joule. Energie bola odvedená v závislosti na čase nasledovne:



obr. 3-15 Obrázok znázorňuje straty energie voľnou konvekciou v závislosti na čase.

Skok spôsobený vo výpočtovom modeli je zapríčinený aproximáciou tepelného modelu atmosféry v závislosti na nadmorskej výške normou ISO 2533:.

3.5.5 Energetické modely letu pre rôzne scenáre

Prvý extrémny scenár vypovedá o energetickej bilancii pri lete v noci, kedy komora nemá príspevok energie od solárneho žiarenia. Tento extrém sme si zvolili z dôvodu zistenia maximálnej straty energie počas letu. Energetický model sme zostrojili jednoduchou sumou tokov energie do kontrolného povrchu a von z kontrolného povrchu komory,

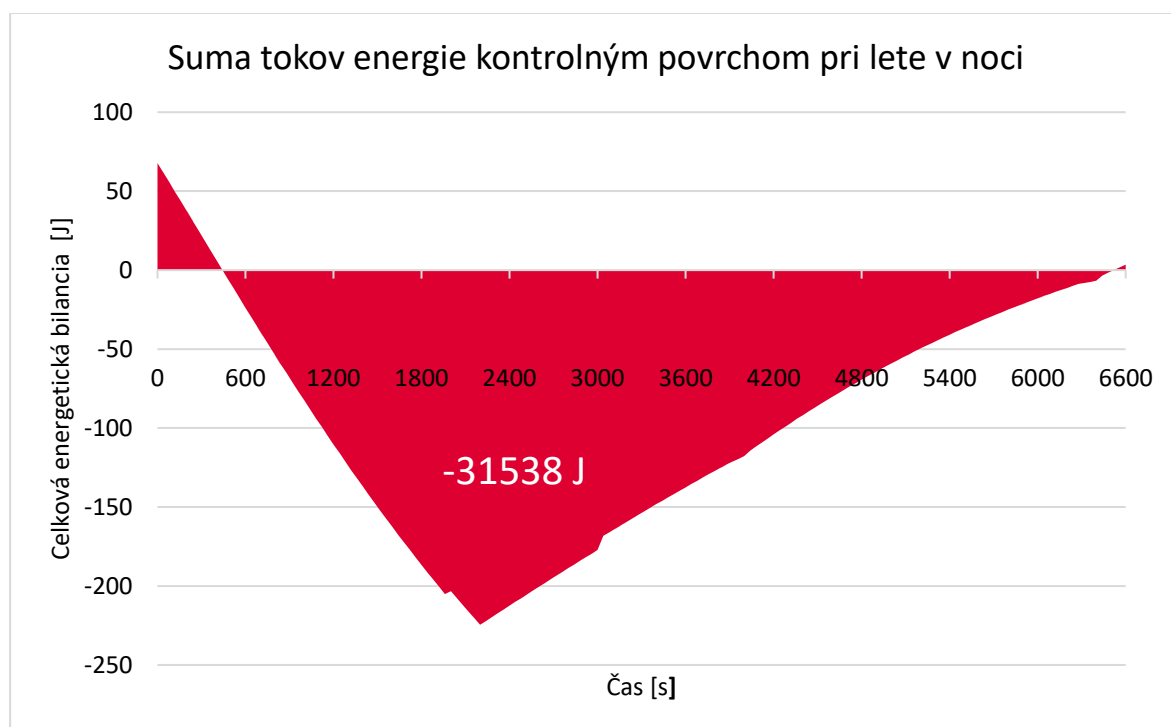
$$\dot{Q}_{c1} = \dot{Q}_i + \dot{Q}_s - \dot{Q}_{c2} \quad (3.25)$$

ktorú sme následne pre násobili časovými intervalmi 40 sekúnd (časový úsek pre konštantnú charakteristiku atmosféry).

$$Q_{c1} = (\dot{Q}_i + \dot{Q}_s - \dot{Q}_{c2}) \cdot t \text{ (40s)} \quad (3.26)$$

Zhotovený energetický model pre let v noci.

$2 \times 15769 = -31538$ Joule. Energia bola odvedená v závislosti na čase nasledovne:



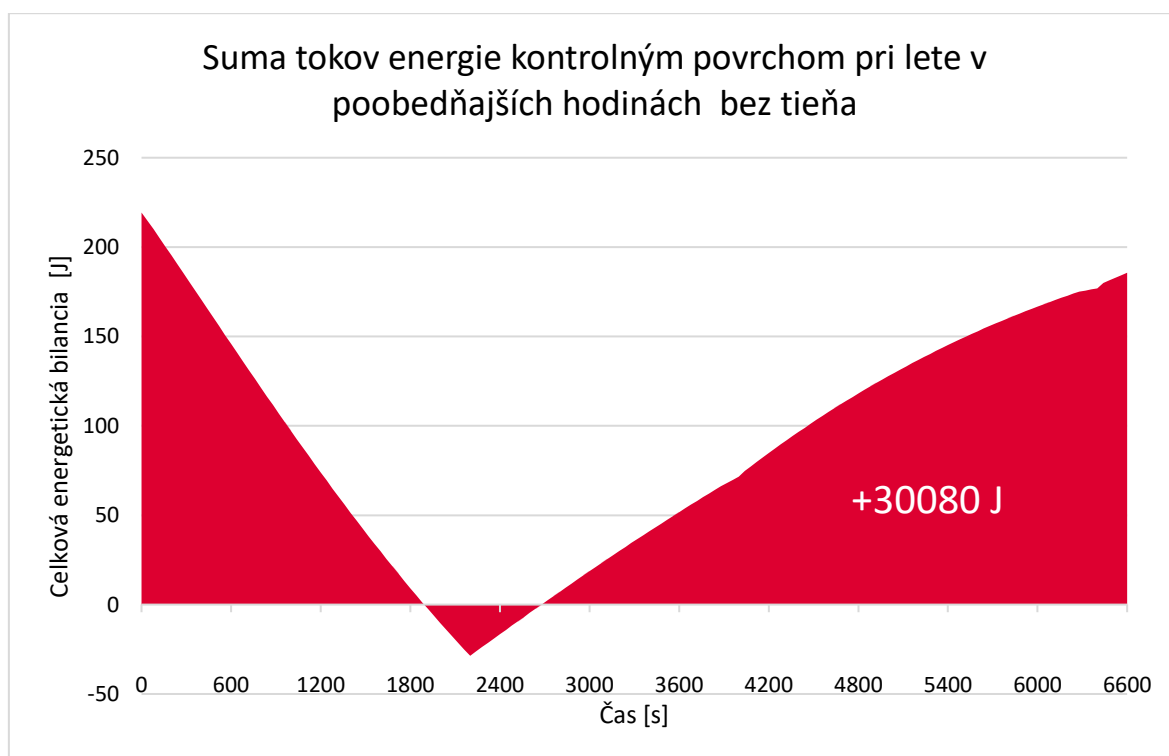
obr. 3-16 Obrázok znázorňuje energetickú bilanciu letu v noci v závislosti na čase.

Druhý extrémny scenár vypovedá o energetickej bilancii pri lete v poobedňajších hodinách bez tieňa, kedy má komora maximálny príspevok energie od solárneho žiarenia. Tento extrém sme si zvolili z dôvodu zistenia maximálneho prírastku energie počas letu. Pri väčšom prírastku ako odvodu energie bude dochádzať k prehrievaniu komory. Zvýšenie teplôt v komore je nepriaznivý stav, takisto ohrozujúci užitočný náklad ako chlad.

Postup pri zhotovovaní energetického modelu opakujeme použitím rovníc (3.25) a (3.26).

Zhotovený energetický model pre let v poobedňajších hodinách bez tieňa.

$2 \times 15040 = 30080$ Joule. Energia bola privedená v závislosti na čase nasledovne:



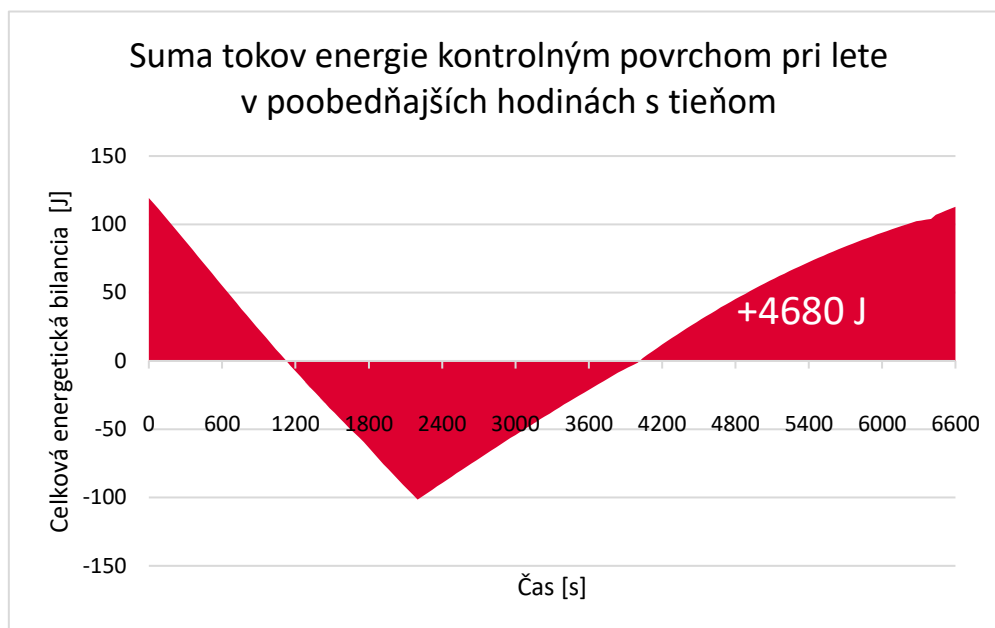
obr. 3-17 Obrázok znázorňuje energetickú bilanciu letu v poobedňajších hodinách bez tieňa v závislosti na čase.

Tretí scenár vypovedá o energetickej bilancii pri lete v poobedňajších hodinách s tieňom, kedy komora vystavená podmienkam, ktoré najlepšie odpovedajú letu balónovej sústavy. Tento scenár sme si zvolili z dôvodu zistenia naliehavosti inštalovať do komory výhrevné teleso.

Postup pri zhotovovaní energetického modelu opakujeme použitím rovníc (3.25) a (3.26).

Zhotovený energetický model pre let v poobedňajších hodinách s tieňom.

$2 \times 2340 = 4680$ Joule. Energia bola privedená v závislosti na čase nasledovne:



obr. 3-18 Obrázok znázorňuje energetickú bilanciu letu v poobedňajších hodinách bez tieňa v závislosti na čase.

Ostré píky grafov sú spôsobené aproximáciou modelu charakteristiky atmosféry v závislosti na nadmorskej výške normou ISO 2533:.

3.6 Zhrnutie výsledkov 3. kapitoly

Z energetických modelov pre lety v rôznych podmienkach vyplýva rozhranie energetickej náročnosti od -31538 J, kedy je potrebné výhrevné teleso, až do náročnosti $+30080$ J, kedy sa naopak bude komora prehrievať. Najpravdepodobnejší scenár hovorí o energetickej bilancii $+4680$ J, kedy podľa energetického modelu budeme musieť komoru vyhrievať výhrevným telesom v časovom trvaní približne 2800 sekúnd (46,7 minút). Hodnoty vypočítané v kapitole 3 sa môžu líšiť od reálneho energetického modelu, napr. z dôvodu zlého tepelného tesnenia komory, nekonštantnej rýchlosti stúpania a klesania. Preto sa odporúča dodatočne otestovať komoru v krykomore, poprípade použiť simulačný softvér špecializovaný na simuláciu prestupu tepla.

4 KONŠTRUKČNÉ A FUNKČNÉ PRVKY

4.1 Ohrev komory

Pri stúpaní do výšky 33 km, kedy sa teplota stratosféry približuje hodnotám -65°C bude na vonkajšie steny boxu vplývať jednak teplota okolia, žiarenie, ale aj prúd vzduchu, ktorý bude obtekať box počas stúpania a neskôr vzostupu.

V mnohých vedeckých článkoch sa často stretávame s tým, že tepelné straty boxu s užitočným nákladom (instrument payload) sú eliminované konštrukciou tohto boxu, najmä zosilnením hrúbky polystyrénových stien a používaním reflexných fólií, ktoré znižujú prestup tepla žiarením. Aj napriek tomu klesne teplota v komore rádovo niekoľko desiatok stupňov pod bod mrazu, avšak nedosiahne teplotu, kedy snímače, kamera a ostatná elektronika prestávajú byť funkčné. Táto práca si vytýčila cieľ, skonštruovať komoru, v ktorej bude počas letu konštantných 20°C . Aby sme v komore dosiahli teplotu cca 20°C , z dôvodu výdrže batérií a funkčnosti užitočného nákladu, na udržanie požadovanej teploty, je potrebné dodávať do priestoru vo vnútri komory teplo, ktoré nahradí tepelné straty prechodom cez polystyrénové steny boxu.

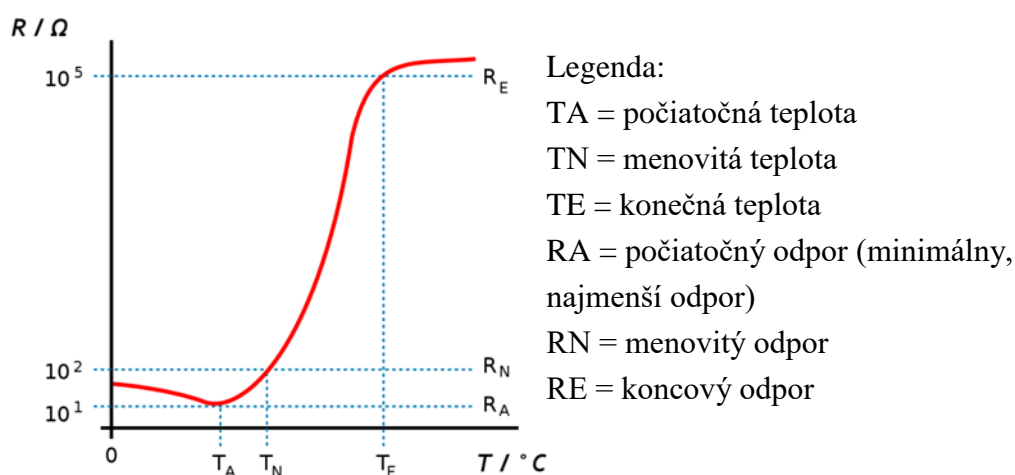
Optika kamery by mala byť umiestnená mimo vyhrievaného boxu, aby sa eliminovala možnosť zrážania vodných pár na šošovke z dôvodu veľkej diferencie teplôt. Vzhľadom na malé rozmery sa v boxe nachádza len malý objem vzduchu, a preto môžeme odhadovať, že na ohrev tohto priestoru je potrebný len malý tepelný výkon, rádovo v desiatkach wattov. Ďalšími požiadavkami okrem tepelného výkonu na zdroj tepla v komore, môžu byť:

- rozmery
- hmotnosť výhrevného elementu a napájacieho zdroja
- bezpečnosť prevádzky
- jednoduchá inštalácia
- spoľahlivosť
- regulácia teploty
- cena

V súčasnosti sú na trhu rôzne typy výhrevných telies, ktoré pracujú na rôznych princípoch. Vzhľadom na obmedzený priestor, kde je potrebné umiestniť výhrevný element sme uvažovali o použití PTC termistorov alebo odporového výhrevného kábla, ktorý bude napájaný jednosmerným prúdom o napätí 6, 9 alebo 12 V. Veľkosť zdroja bude závisieť od požadovaného tepelného výkonu výhrevného telesa.

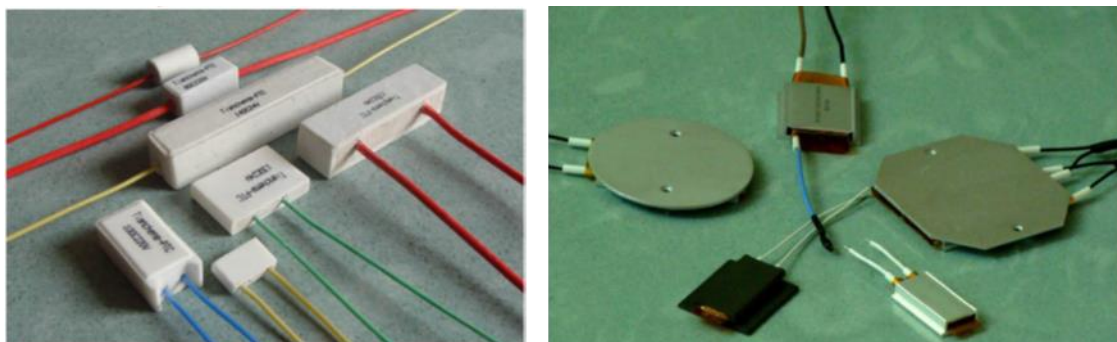
4.1.1 PTC termistory

PTC (Positive Temperature Coefficient) termistory ponúkajú mnohé využitia v priemysle. Jedná sa o termistory, ktoré využívajú pozitívny koeficient a ich odpor rastie so zvyšujúcou sa teplotou. PTC termistory sa tradične využívali v elektrických obvodoch na stabilizáciu alebo obmedzenie prúdu, tečúceho obvodom (nadprúdová ochrana). Prúd pretekajúci obvodom ohrieva termistor a jeho odpor stúpa, čo spôsobí obmedzenie pretekajúceho prúdu. Po ochladení termistoru, jeho odpor klesne a následne môže pretekať vyšší prúd až do doby, pokiaľ sa termistor opäť nezohreje. Charakteristiku PTC termistora môžeme vidieť na obr. 4-1, So zvyšujúcou sa teplotou stúpa aj odpor termistora PTC.[18]



obr. 4-1 Obrázok znázorňuje charakteristiku PTC termistora.[18]

V súčasnosti je mnoho výrobcov, ktorý ponúkajú širokú škálu rôznych PTC termistorov, ktoré sú určené na ohrievanie. Môžu byť umiestnené v hliníkovom obale, zaliate do keramiky, plastu alebo do živcového obalu, čím sa zvyšujú možnosti ich využitia.



obr. 4-2 Obrázok znázorňuje rôzne typy PTC termistorov firmy Shenzhen TianCheng QianHai Tech Development Co.,Ltd.[18]

Termistory nachádzajú využitie v rôznych výrobkoch ako sú žehlička na vlasy, rôzne ohrievače kvapalín, technologických celkov, výhrevné elementy pri spracovaní polymérov v plastikárskych lisoch a pod. PTC termistory sa používajú taktiež aj v meracích obvodoch prístrojov pre meranie teploty.

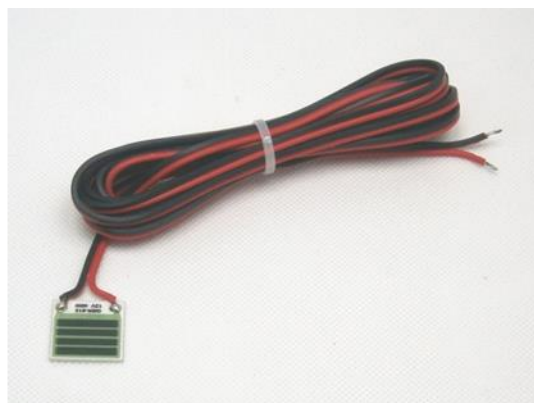
Výhodou PTC termistorov je vysoká citlivosť a pomerne rýchla odozva na zmenu teploty. PTC termistor, ako vyhrievacie teleso, dosiahne za krátky čas požadovaný výkon a dokáže svoju povrchovú teplotu udržiavať v istom teplotnom rozsahu. Medzi nevýhody použitia PTC termistorov patrí ich nelineárna charakteristika a obmedzený teplotný rozsah používania.[18]

4.1.2 Odporový výhrevný kábel

Odporový výhrevný kábel je tvorený sústavou paralelne zapojených odporov alebo polovodičových prvkov, ktoré sú prepojené na izolované napájacie vodiče. Pri prechode prúdu sa odporové elementy zahrievajú, takže pri konštantnom napájaní dosiahne výhrevný kábel stabilizovanú teplotu. Využitie ohrevných káblov je najmä v miestach, kde sa vyžaduje proti mrazová ochrana potrubí, nádrží, odkvapových rúr, železničných výhybiek a rôznych technologických častí. Výhrevné káble, ktoré dosahujú vyššiu teplotu je možné použiť na vykurovanie budov, na predohrev strojných častí, ohrev asfaltových potrubí, nádrží a pod.

Výhrevný kábel má podobne vlastnosti ako PTC termistor, samoregulačnú funkciu teploty, a preto je vhodný aj pre použitie bez prídavného regulátora teploty.

Princíp polovodičových odporových prvkov sa využíva aj pri výrobe rôznych výhrevných telies. Telo výhrevného telesa je vyrobené z keramiky, plastu alebo z fólie, na ktorého povrchu sú nanesené pomocou sieťotlače polovodičové výhrevné elementy z oxidu hliníku. Ploché výhrevné telesá si pre svoje rozmery a tepelný výkon našli uplatnenie vo viacerých oblastiach priemyslu.[18],[19]

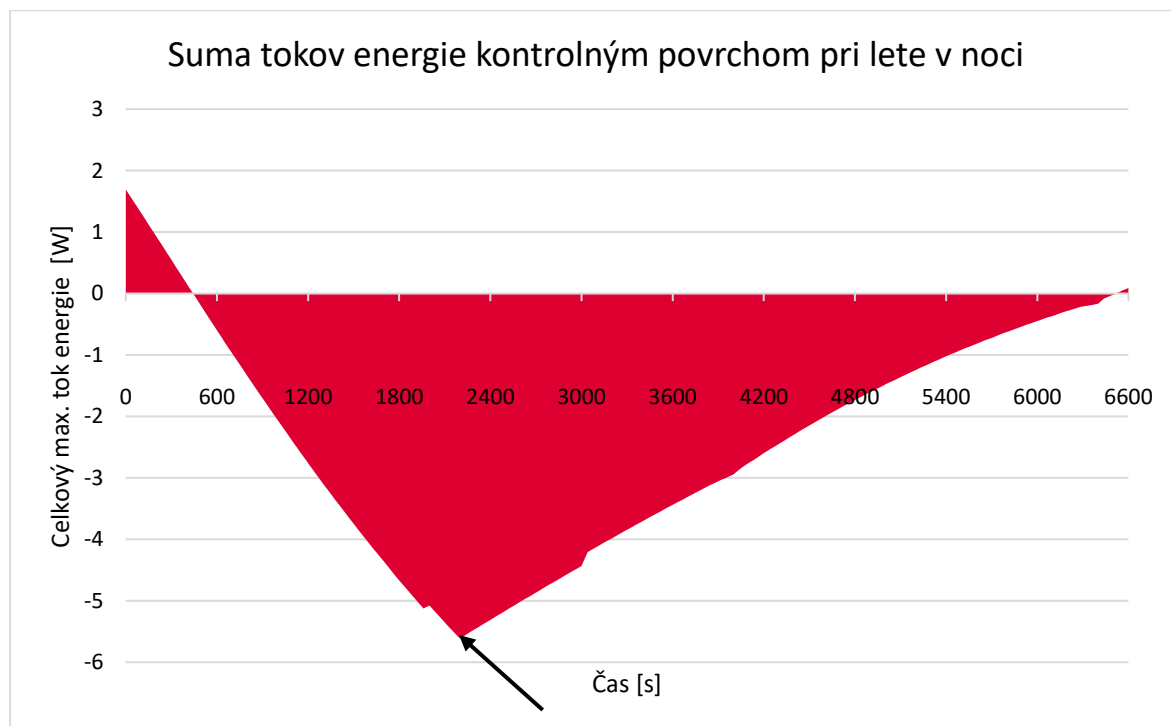


obr. 4-3 Obrázok 12V/12W ohrevná fólia ohybná, samolepiaca (110x77mm) na ľavo, 12V/40W MINI ploché výhrevné teleso (26x26mm) na pravo.[19]

Teplota výhrevných telies môže na svojom povrchu bez chladenia dosiahnuť krátkodobo až 350°C, a preto je dôležité pri ich aplikácii uvažovať s dostatočnou distribúciou tepla do okolia. Mnohé výhrevné telesá dosahujú povrchovú teplotu nižšiu ako 80°C, čo im umožňuje ich použitie bez ďalšieho prídavného regulátora teploty.

4.1.3 Teoretický výpočet výkonu vyhrievacieho telesa

Návrh výhrevného telesa musíme robiť s ohľadom na tepelné straty polystyrénového boxu tak, aby sme udržali vnútornú teplotu v komore cca 20°C, pričom vonkajšia teplota stratosféry bude cca -65°C. Podľa energetickej bilancie letu, viz. kapitola 3, bude maximálny tok energie \dot{Q}_{c1} vystupujúci z komory pri extrémnom scenári letu v noci nasledovný:



obr. 4-4 Obrázok celkového max. toku energie pri lete v noci.

V bode maxima toku energie z povrchu komory do okolia bude celkový tok okolo 5,5 W.

4.1.4 Výber výhrevnej fólie

Pre náš experiment sme sa rozhodli použiť ohybnú, samolepiacu ohrevnú fóliu s tepelným výkonom 12W, ktorú budeme napájať 12 V batérie. Na vnútorné steny polystyrénového boxu nalepíme hliníkovú fóliu, aby sme znížili prechod tepla vzniknuté vlastnou emisivitou užitočného nákladu do okolitého priestoru. Rozmer fólie 110 x 77 mm nám umožní nalepiť ohrevnú fóliu na vnútornú konštrukciu polystyrénového boxu. Plášť ohrevnej fólie je vyrobený z polyesteru a je odolný voči mechanickému poškodeniu a pretrhnutiu. [19]

Na samolepiacej ploche je nanesené akrylátové lepidlo, ktoré zabezpečí pevné priľnutie k povrchu. Hmotnosť fólie s prírodnými vodičmi je len 13 gramov, čo zabezpečí nenavýšenie hmotnosti komory. V prípade zvýšenia tepelného výkonu môžeme paralelne zapojiť ďalšiu fóliu na protiahlú stenu konštrukcie. Povrchová teplota fólie je cca. 75°-80°C, ale uvažujeme, že sa tepelný tok rozptýli voľnou konvekciou do priestoru boxu. V prípade prehrievania priestoru je možné použiť prídavný regulátor teploty. Technickú špecifikáciu výhrevnej fólie sú uvedené v nasledujúcej tab. 4-1.[19]

PARAMETER	HODNOTA
napájanie	12V
výkon	12W, +-10% (1A)
hrúbka	cca. 0,4 mm
prívodný kábel / dĺžka	cca. 0,22m
povrchová teplota	75° až 80°C (bez chladenia) pri okolitej teplote cca. 20°C
pracovná teplota	-40° až 95°C
veľkosť	110x 77mm
výhrevný element	zliatina odporového polovodiča
plášť výhrevného telesa	polyester (PES)
samolepiaci povrch	akrylátové lepidlo, jedna strana
farba	priesvitná
krytie	IP64

tab. 4-1

Parametre 12V/12W ohrevná fólia ohybná, samolepiaca (110x77mm).[19]

4.1.5 Výber napájacieho zdroja

Napájanie ohrevnej fólie zabezpečíme 12 V zdrojom jednosmerného prúdu. Na trhu je mnoho rôznych typov napájacích zdrojov, ale keďže je potrebné rešpektovať kritériá uvedené v úvode tejto kapitoly, zúžime náš výber na zdroj, ktorý bude mať minimálnu hmotnosť a maximálnu kapacitu v mAh, aby zabezpečil prevádzku ohrevnej fólie minimálne počas 4 hodín letu.

Nabíjateľná lítiová batéria na 12V má kapacitu 6 500mAh. Batéria je navyše vybavená ON / OFF vypínačom. Batériu síce nabíjame cca 20 hodín pomocou napájacieho adaptéru, ale veľkou výhodou tejto batérie je jej hmotnosť, ktorá je len 190 g.[20]

Technickú špecifikáciu lítiovej batérie sú uvedené v nasledujúcej tab. 4-2.

PARAMETER	HODNOTA
Vstupné napájanie	12,6V DC
Počet nabíjacích cyklov	> 500
Napätie	12V / 1 000 mA
Kapacita	6500 mAh
Váha	190 g
Rozmery	107 x 52 x 17 mm
Doba nabíjania	20 hodín

tab. 4-2

Parametre 12V 6500mAh nabíjateľnej lítiovej batérie.[20]



obr. 4-5 Obrázok 12V 6500mAh nabíjateľná lítiová batéria.[20]

4.1.6 Výber termostatu

V prípade, že samotná ohrevná fólia by udržiavala teplotu v polystyrénovom boxe viac ako je 20°C, môžeme do elektrického obvodu inštalovať termostat, ktorý by rozopol obvod v prípade, že by teplota presiahla nastavenú teplotu. My sme zvolili MINI termostat -10° až +50°C. Termostat funguje na princípe bimetalového snímača, ktorý sa skladá z dvoch rôznych kovov s rozdielnou teplotnou rozťažnosťou. Vplyvom zvyšujúcej sa teploty sa kontakt deformuje a rozopne elektrický okruh napájania ohrevnej fólie.



obr. 4-6 Obrázok MINI termostat -10° až +50°C.[21]

Výhodou tohto termostatu je, že nepotrebuje externé napájanie, jeho rozmery a hmotnosť, ktorá je len 57 gramov.[21]

Súhrnné technické parametre termostatu sú uvedené v tabuľke č. 4-3.

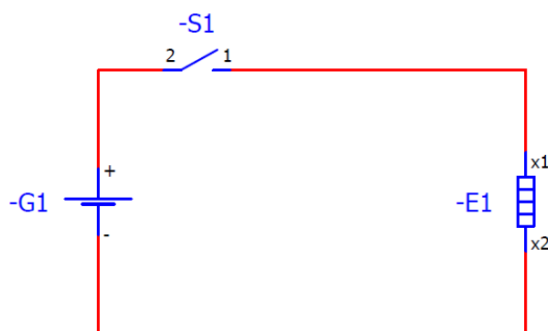
PARAMETER	HODNOTA
montáž	povrch/ DIN lišta (35 mm)
max. záťaž	odporová 2300W/ 230V (10A/ 230V)
max. záťaž	indukčná 450W/ 230V (2A/ 230V)
kontakt	rozpínací (NC)
regulácia teploty	-10° až +50°C
prevádzková teplota	-45° až +80°C (-49° až +176°F)
hysterézia	7°K (±4°K tolerancia)
čidlo	termo/ bimetal
pripojenie vodičov	do 2,5mm ²
odpor kontaktu	< 10MΩ
životnosť	>100 000 cyklov
normy	EN 55014-1-2, EN 61000-3-2, EN 61000-3-3

veľkosť	dĺžka 60, šírka 33, výška 43mm
celková váha	57gr
krabica	svetlo šedý plast UL94 V-0
krytie	IP20

tab. 4-3 Technické údaje MINI termostat -10° až +50°C.[21]

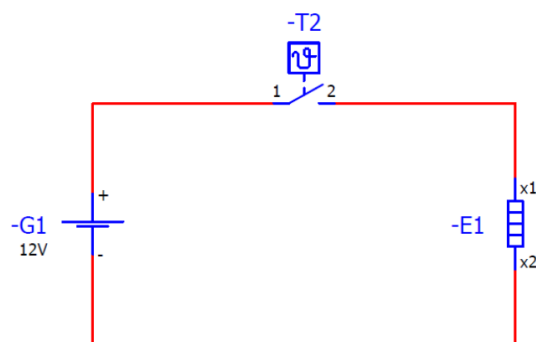
4.1.7 Zapojenie komponent do elektrického obvodu

Na doleuvedenej, veľmi jednoduchej elektrickej schéme, je zapojenie ohrevnej fólie do elektrického obvodu bez použitia termostatu. Napájací zdroj jednosmerného prúdu G1 napája ohrevnú fóliu E1 cez vypínač S1.



obr. 4-7 Zapojenie ohrevnej fólie na zdroj jednosmerného prúdu bez termostatu.

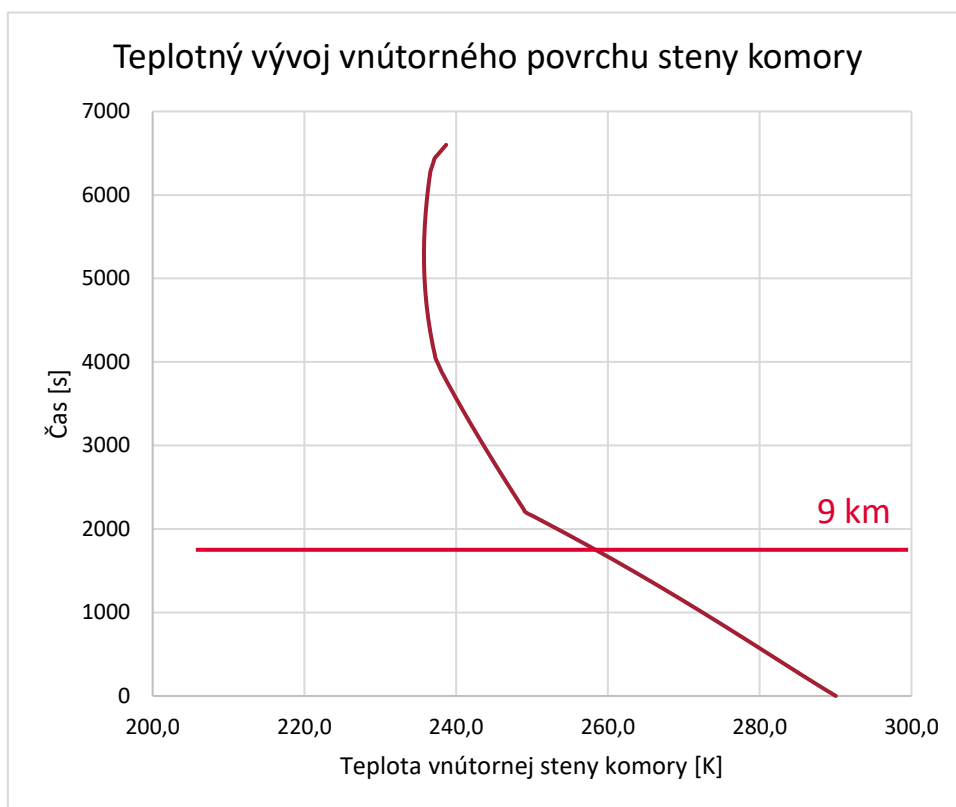
Pokiaľ sa rozhodneme do elektrického obvodu zaradiť termostat, schéma elektrického zapojenia bude nasledovná. Zdroj G1 bude napájať ohrevnú fóliu cez spínač S1 a termostat T2. V prípade, že teplota presiahne požadovanú teplotu, nastavenú na termostate, rozpojí sa obvod a výhrevná fólia prestane ohrievať vzduch v komore. Pre správne fungovanie termostatu je potrebné ho uložiť čo najďalej od výhrevnej fólie. Pokiaľ teplota vzduchu poklesne pod požadovanú teplotu, zopne sa obvod a výhrevná fólia začne ohrievať. Teplota v komore bude oscilovať v určitom rozsahu, pretože musíme brať do úvahy hysteréziu termostatu.



obr. 4-8 Zapojenie ohrevnej fólie na zdroj jednosmerného prúdu bez termostatu.

4.2 Vlhkosť vzduchu v komore

Počas letu balónového systému bude dochádzať ku kondenzácii vodných pár na stenách vnútorného povrchu komory, kde bude dochádzať k veľkým rozdielom teplôt. Vývoj teplôt vnútornej steny T_{iw} na čase bude nasledovná:



obr. 4-9 Teplotný vývoj vnútorného povrchu komory na čase.

Pričom riešiť vlhkosť vo vnútri komory má zmysel len do nadmorskej výšky 9 km, nad hranicou 9 km je vlhkosť zanedbateľná.

K najčastejšie používaným adsorpčným materiálom patria: uhlíkaté adsorbenty (aktívne uhlie, aktívny koks, uhlíková molekulové sitá), silikagél, molekulové sitá a alumínia. Na ochranu komory pred vlhkosťou sme zvolili umiestnenie niekoľkých vrecúšok so silikagélom do dutiny komory, umiestnených v rohoch. Silikagél je z viac ako 95% tvorený oxidom kremičitým. Silikagél má hydrofilné vlastnosti a používa sa teda na sušenie plynov. Silikagél je zrnitá, pórovitá forma oxidu kremičitého (SiO_2) vyrábaná synteticky z kremičitanu sodného. Má vysokú porozitu, okolo $800 \text{ m}^2/\text{g}$, ktorá umožňuje ľahko adsorbovať vodu. Silikagél môže znížiť relatívnu vlhkosť uzatvoreného systému až na 40%.. Výhody Silikagelu sú, že je netoxický, nehorľavý, chemicky vysoko inertný a cenovo veľmi prístupný. Bežný silikagél pojme množstvo vody zodpovedajúce približne 20% jeho hmotnosti. [22, 23]

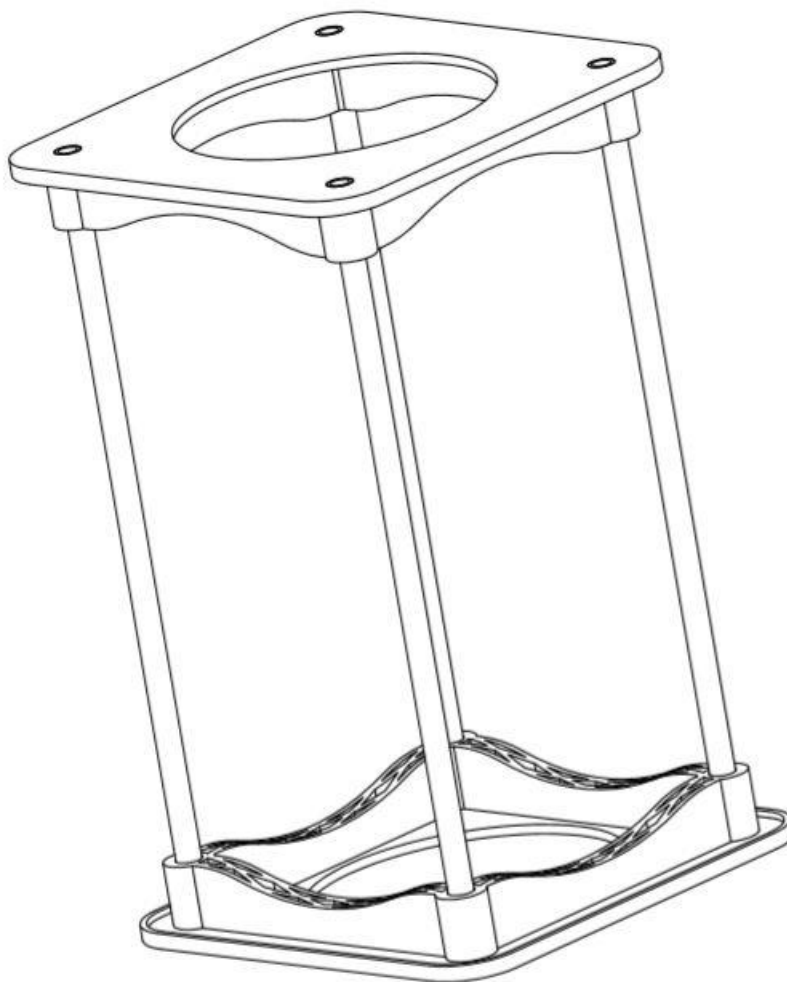


obr. 4-10 Obrázok vrecúšok so silikagélom.[22]

4.3 Konštrukčné a funkčné návrhy

Pre spevnenie konštrukcie vyhrievanej komory sme navrhli a zostrojili jednoduchú opornú kostru komory, ktorá sa skladá z:

- dvoch základní (bottom parts) vytlačených na 3D tlačiarňi použitím materiálu PLA, ktorá je najpopulárnejším materiálom na 3D tlač, z dôvodu málo chybovej tlače a rozložiteľnosti v prírode.[24]
- štyroch modelárskych karbónových trubiek o rozmeroch 8x6x25 mm, ktoré spájajú oproti sebe orientované základne.



obr. 4-11 Obrázok zostava opornej kostry komory.

Kostra komory je osadená do polystyrénových segmentov o šírke steny 3 cm, ktoré sú rezané na mieru na rezačke polystyrénov.

Na vyrovnanie tlaku vzduchu v komore, aby nedošlo k poškodeniu komory , spôsobené rozdielmi tlaku prostredia a vnútra komory, sa do vrchnej a spodnej časti komory inštalovali malé jednosmerné ventily TG904. Tieto ventily sú bežne používané v klasických zapalovačoch.



obr. 4-12 Obrázok jednosmerného ventilu TG904.[30]

5 ZÁVER

Našou úlohou bolo komplexne analyzovať problematiku letu balónového systému atmosférou, pochopiť dané aspekty letu ako dynamiku letu a energetickú bilanciu komory, ktoré sa vzájomne ovplyvňujú, následne sme zhotovili tri rôzne energetické modely letu. A to let cez noc, cez deň v poobedňajších hodinách bez tieňa a let cez deň v poobedňajších hodinách s tieňom. Na základe výsledkov sme dospeli k záveru, že navrhnutá komora bude potrebovať vyhrievanie z vnútra. Previedli sme rešeršnú prácu na získanie predstavy potrebného výhrevného telesa, batérie, poprípade termostatu. Výpočtami sme určili potrebnú charakteristiku výhrevného telesa a batérie.

Medzi najväčšie výzvy tejto práce patrili nedostatok literatúry a zdrojov údajov, ktoré sme si museli nahrádzať zložitými výpočtami, poprípade empirickými vzťahmi, najmä v oblasti energetickej bilancie a charakteristík prostredia.

Do budúcnosti sa bude nami navrhnutá komora testovať v krykomore v záštite energetického ústavu VUT, kde sa budú kontrolovať vypočítané hodnoty energetickej bilancie v extrémnych chladoch a pri extrémnom žiarení.

6 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

1. UPSON, Ralph H. Scientific Ballooning Handbook: EVOLUTION OF BALLOONING. *NCAR TECHNICAL NOTE*. 1975, 1975(IA-99), 7-33. DOI: 10.5065/D6G73BM1.
2. MORRIS, Alvin L. Scientific Ballooning Handbook: ENERGY BALANCE AND A FLIGHT MODEL. *NCAR TECHNICAL NOTE*. 1975, 1975(IA-99), 33-85. DOI: 10.5065/D6G73BM1.
3. Kaymont Consolidated Industries. *Kaymont* [online]. Melbourne: Kaymont Consolidated Industries, 2010 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.kaymont.com/>
4. *Rocketman Parachutes* [online]. Bloomington: Dave The Web Guy, 2018 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://the-rocketman.com/contact-us/>
5. *High Altitude Science* [online]. Tampa: High Altitude Science, 2011 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.highaltitudescience.com/>
6. *Space Flight: Balloon Burst Calculator* [online]. Cambridge: Cambridge University, 2012 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <http://habhub.org/calc/>
7. *ASTRA High Altitude Balloon Flight Planner* [online]. Southampton: University of Southampton, 2013 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <http://astra-planner.soton.ac.uk/>
8. Troposféra. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Troposphere#cite_note-DLA-3
9. KREITH, Frank. Scientific Ballooning Handbook: ENERGY BALANCE AND A FLIGHT MODEL. *NCAR TECHNICAL NOTE*. 1975, 1975(IA-99), 86-145. DOI: 10.5065/D6G73BM1.
10. *Přenos tepla prouděním: 3/5 Přenos tepla, Termomechanika* [online]. Brno: Onlineschool cz, 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=5wEnfynJiss&t>

11. ISO 2533:1975. *Standard Atmosphere*. International Organization for Standardization. Geneva: ISO Central Secretariat, 1975.
12. FERSTL, Karol a Michal MASARYK. *Prenos tepla*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2011. ISBN 978-80-227-3534-6.
13. FERSTL, Karol a Michal MASARYK. *Prenos tepla príklady: 2. časť - Prenos tepla konvekciou*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2016. ISBN 978-80-227-4627-4.
14. INCROPERA, Frank P. a David P. DEWITT. *Introduction to Heat Transfer*. 4th edition. Hoboken: John Wiley, 2002n. l. ISBN 0-471-38649-9.
15. MEDVEĎ, Dušan. *Žiarenie (radiácia, sálanie): Premeny elektrickej energie*. Technická univerzita v Košiciach. Košice, 2007. Dostupné také z: http://people.tuke.sk/dusan.medved/PEE/pee_cv_3.pdf
16. KASTEN, Fritz a Andrew T. YOUNG. Revised optical air mass tables and approximation formula. *Applied Optics*. 1989, 28(22), 4735-4738. DOI: 10.1364/AO.28.004735. ISSN 0003-6935. Dostupné také z: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ao-28-22-4735>
17. Air mass: astronomy. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Air_mass_\(astronomy\)#cite_ref-3](https://en.wikipedia.org/wiki/Air_mass_(astronomy)#cite_ref-3)
18. Termistor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 2018 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: https://sk.wikipedia.org/wiki/Termistor#cite_ref-meas_1-1
19. 12V/12W ohrevná fólia ohybná, samolepiaca (110x77mm). *HUDINY* [online]. Levice: Hudiny s.r.o, 2017, 2017 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.hudiny.sk/12v-6w-ohrevna-folia-ohybna-samolepiaca-110-x-77mm.html>
20. 12V 6500mAh dobíjecí lithiová baterie. *SPYobchod* [online]. Praha: Weby24.cz, 2010, 2017 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.spyobchod.cz/12v-6500mah-dobijeci-lithiova-baterie-e124318.htm>

21. MINI termostat -10° až +50°C (pre kúrenie). *SPYobchod* [online]. Praha: Weby24.cz, 2010, 2017 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.hudiny.sk/mini-termostat-10-az-50-c-pre-kurenie.html>
22. Silikagel. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 2018 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Silikagel>
23. JÍLKOVÁ, Lenka, Veronika VRBOVÁ a Karel CIAHOTNÝ. *Stanovení vnitřního povrchu adsorbentů vhodných k úpravě bioplynu*. Energie z biomasy XV. Lednice, 2014. Dostupné také z: www.eu.fme.vutbr.cz/file/308_1_1/
24. ALT LLC: Common 3d Printing Materials [online]. Santa Barbara: ALT, 2016 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.3dalt.com/contact>
25. Bursting of a balloon at high altitude. In: Quora [online]. Mountain View: Quora, 2010, 2018 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.quora.com/Why-does-a-balloon-rise-and-burst>
26. Natural convection. In: Wikipedia [online]. Internet: Wikipediaw, 2001, 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Natural_convection
27. Concept IAA. In: Mercedes-Benz [online]. Štuttgart: Mercedes-Benz, 2001, 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.mercedes-benz.co.uk/passengercars/mercedes-benz-cars/futurecars/mercedes-benz-concept-iaa/introduction.module.html>
28. Thermal effects of substrate materials used in the laser curing of particulate silver inks. In: ResearchGate [online]. Internet: ResearchGate, 2008, 2007 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/233814472Thermal_effects_of_substrate_materials_used_in_the_laser_curing_of_particulate_silver_inks
29. List of cloud types. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 2019 [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_cloud_types

30. Nozzle unit for Electronic lighter. In: Globalsources [online]. Honk Kong: globalsources, 2001-, 1995 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.globalsources.com/si/AS/Dingxing-Plastic/6008839604850/pdtl/nozzle-unit/1039629722.htm>

7 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN

F_{vz}, F_f, F, F_D	сила [N]
g	gravitačné zrýchlenie [$m \cdot s^{-2}$]
$m_a, m_g, m_B, m_l, m_G, m_v$	hmotnosť [kg]
p, p_a, p_g	tlak [Pa]
ρ, ρ_a, ρ_g	hustota [Kg/m^3]
z	výška [m]
M, M_g, M_a	molárna hmotnosť [Kg/kmol]
R	univerzálna plynová konštanta [8,314 4598 J·K ⁻¹ ·mol ⁻¹]
$T, T_a, T_g, T_{is}, T_{iw}, T_{ow}, T_c$	teplota [K]
La, Lg	vertikálny teplotný gradient [K.m ⁻¹]
V_g, V_g	objem [m ³]
π	supertlak [Pa]
Φ	superteplota [K]
C_D, C_L	koefficient odporu [-]
A_D, A_L	efektívna plocha [m ²]
v_a, v_B, w	rýchlosť [$m \cdot s^{-1}$]
l, l_s	charakteristický rozmer [m]
μ_a	dynamická viskozita [Pa·s]
ΔU	zmena vnútornej energie [J]
$Q_{c1}, Q, q_{fci}, q_{c1}, q_i, q_s, q_{c2}, q_r$	teplo [J]

W	práca [J]
$\dot{Q}_c, \dot{Q}_{fci}, \dot{Q}_{c1}, \dot{Q}_i, \dot{Q}_s, \dot{Q}_{c2}, \dot{Q}_r$	tepelný tok [$J \cdot s^{-1}$]
S_c, S_o, S_{po}	plocha, povrch [m^2]
t	čas [s]
γ	teplotný súčiniteľ rozťažnosti [-]
ν	kinematická viskozita [$m^2 \cdot s^{-1}$]
D_i, D_k	priemer [m]
ε_k	koeficientom tepelnej vodivosti [-]
$\lambda_{ekv}, \lambda_{str}, \lambda$	súčiniteľ teplotnej vodivosti vzduchu [$W/m \cdot K$]
α_o	súčiniteľ prestupu tepla [$W/(m^2) \cdot K$]
$\tau_\lambda, \rho_\lambda$	materiálové charakteristiky [-]
σ	Stefan-Boltzmanova konštanta [$5,670\,367 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$]
$\dot{q}_{fci}, \dot{q}_{c1}, \dot{q}_i, \dot{q}_s, \dot{q}_{c2}, \dot{q}_r, \dot{q}_{s,m}, \dot{q}_{sd}$	hustota tepelného toku [$W \cdot m^{-2}$]
AM_o	koeficient optickej vzdušnej hmotnosti [-]

8 ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV

obr. 2-1	Obrázek prejavu tlakových síl na plochu stien balóna.	20
obr. 2-2	Obrázek rozdelenia hmotností	21
obr. 2-3	Obrázok priebehu explózie Kaymont HAB 1200g	28
obr. 2-4	Obrázok padáku Rocketman 3ft.....	28
obr. 2-5	Obrázok popisujúci jednotlivé okná v ballonn burst calculátor.....	29
obr. 2-6	Obrázok užívateľského prostredia.....	31
obr. 2-7	Obrázok simulácie dňa 4.5.2019	32
obr. 2-8	Obrázok simulácie dňa 1.5.2019	33
obr. 2-9	Obrázok simulácie dňa 15.5.2019	33
obr. 3-1	Obrázok schémy prestupu tepla kontrolným povrchom	37
obr. 3-2	Obrázok závislosti teploty vzduchu na čase	39
obr. 3-3	Obrázok závislosti hustoty vzduchu na čase.....	40
obr. 3-4	Obrázok závislosti tlaku vzduchu na čase	40
obr. 3-5	Obrázok voľnej konvencie vzduchu ohrievaného ľudskou rukou	41
obr. 3-6	Obrázok znázorňuje teplotnú degradáciu spôsobenú voľnou konvekciou	42
obr. 3-7	Obrázok nútej konvencie vzduchu pri obtekaní auta v aerotunely.....	44
obr. 3-8	Obrázok znázorňuje teplotnú degradáciu spôsobenú nútenou konvekciou	45
obr. 3-9	Obrázok znázorňuje odrazivosť hliníku (Al), zlata (Au) a striebra (Ag)	47
obr. 3-10	Obrázok znázorňuje rôzne typy oblačnosti.....	50
obr. 3-11	Obrázok znázorňuje okamžitú orientáciu plochy S_{po}	51
obr. 3-12	Obrázok znázorňuje distribúciu priameho slnečného žiarenia pod uhlom θ ...	52
obr. 3-13	Obrázok znázorňuje distribúciu infračervenej energie v závislosti na čase.....	54
obr. 3-14	Obrázok znázorňuje distribúciu solárnej energie v závislosti na čase	55
obr. 3-15	Obrázok znázorňuje straty energie voľnou konvekciou v závislosti na čase....	56
obr. 3-16	Obrázok znázorňuje energetickú bilanciu letu v noci v závislosti na čase	57
obr. 3-17	Obrázok znázorňuje energetickú bilanciu letu v poobedňajších hodinách bez tieňa v závislosti na čase.....	58

obr. 3-18	Obrázok znázorňuje energetickú bilanciu letu v poobedňajších hodinách bez tieňa v závislosti na čase.....	59
obr. 4-1	Obrázok znázorňuje charakteristiku PTC termistora	61
obr. 4-2	Obrázok znázorňuje rôzne typy PTC termistorov firmy Shenzhen TianCheng QianHai Tech Development Co.,Ltd.....	61
obr. 4-3	Obrázok 12V/12W ohrevná fólia ohybná, samolepiaca (110x77mm) na ľavo, 12V/40W MINI ploché výhrevné teleso (26x26mm) na pravo	62
obr. 4-4	Obrázok celkového max. toku energie pri lete v noci.....	63
obr. 4-5	Obrázok 12V 6500mAh nabíjateľná lítiová batéria.....	65
obr. 4-6	Obrázok MINI termostat -10° až +50°C	66
obr. 4-7	Zapojenie ohrevnej fólie na zdroj jednosmerného prúdu bez termostatu	67
obr. 4-8	Zapojenie ohrevnej fólie na zdroj jednosmerného prúdu bez termostatu	68
obr. 4-9	Teplotný vývoj vnútorného povrchu komory na čase	68
obr. 4-10	Obrázok vrecúšok so silikagélom	69
obr. 4-11	Obrázok zostava opornej kostry komory	70
obr. 4-12	Obrázok jednosmerného ventilu TG904	71

9 ZOZNAM TABULIEK

tab. 2-1	Molárne hmotnosti zdvihových plynov pre stratosférické balóny.....	18
tab. 2-2	Fyzikálny charakter plynu v balóne	23
tab. 2-3	Vlastnosti latexového balóna Kaymont HAB 1200.....	27
tab. 2-4	Vlastnosti padáku Rocketman 3ft	28
tab. 3-1	Hustota žiarenia \dot{q}_{io} pôsobiaca na komoru vo vertikálnom smere.....	49
tab. 4-1	Parametre 12V/12W ohrevná fólia ohybná, samolepiaca (110x77mm)	64
tab. 4-2	Parametre 12V 6500mAh nabíjateľnej lítiovej batérie.	65
tab. 4-3	Technické údaje MINI termostat -10° až +50°C	66

10 ZOZNAM PRÍLOH